



FACULTAD DE CIENCIAS Y
TECNOLOGÍA

CIENCIA Y TECNOLOGÍA

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN - FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA - UMSS

Número 15 - 2023



Cochabamba - Bolivia

**Universidad Mayor de San Simón
Facultad de Ciencias y Tecnología
Instituto de Investigación**

Revista Ciencia y Tecnología, Número 15, Año 2023
de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor
de San Simón.

La Revista Ciencia y Tecnología es una publicación que busca incentivar el diálogo entre la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor de San Simón y los sectores de la sociedad involucrados en aspectos de desarrollo científico y tecnológico.

Autoridades facultativas:

Ing. Juan Terrazas Lobo
Decano

Dr. Lucio Alejo Espinoza
Director Académico

M.Sc. Ingrid Vicky Trigo Rocha
Directora Instituto de Investigación

Diseño de portada:

M.Sc. Aidee Vargas Colque
Lic. Daniela Andrea Mareño Rocha

Fotografías de portada y contraportada:

Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos (LAP)

Portada: Personal realizando ensayos de laboratorio: Deformación permanente de mezclas asfálticas (izq.), elaboración de cuerpos de prueba en compactador giratorio (der.)

Contraportada: Personal, equipos de laboratorio y estudiantes de la mención vialidad de la carrera de Ingeniería Civil realizando ensayos.

Contactos:

Calle Sucre frente Parque La Torre
Teléfono: 4231765
Fax: 591-4541781
Correo: iicyt@fcyt.umss.edu.bo

Los artículos de la presente revista son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Queda prohibida cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra que no cuente previamente con autorización de los titulares de propiedad intelectual.



Revista

**CIENCIA Y
TECNOLOGÍA**

Nº 15

Presentación

Comité Editorial

M.Sc. Ingrid Trigo Rocha (Coordinadora)

Dr. Wilson Aguilar Mamani

Ing. MBA Boris Alfaro Bazan

M.Sc. Henry Antezana Fernández

Ing. Jaime Ayllón Acosta

Mgr. Boris Camacho Peña

Dra. Evelyn Cardozo Paz

Mgr. Alvaro Carrasco Calvo

Dra. Vanesa Castro Alba

Dr. Edwin Escalera Mejía

Dr. Andrés Gonzales Amaya

Dr. Marcelo Heredia Gómez

Ing. Nelson Hinojosa Salazar

M.Sc. Mercedes Iriarte Puña

Dr. Marcelo Lucano Lucano

M.Sc. Yony Richard Montoya Burgos

Dr. Danny Rejas Alurralde

Dra. Cinthia Carola Rojas Arnez

M.Sc. Ana María Romero Jaldín

Dra. Patricia Romero Rodríguez

Dr. Jerry Solís Valdivia

Dr. Juan Carlos Terrazas Vargas

M.Sc. Luis Zegarra Dorado

Edición y diseño

M.Sc. Aidee Vargas Colque

Uno de los objetivos del Instituto de Investigación de la Facultad de Ciencias y Tecnología es impulsar la difusión de los métodos y resultados de investigaciones científicas en las distintas áreas de la ciencia y tecnología, y con ello contribuir a ensalzar el renombre de la Universidad Mayor de San Simón.

En esta décima quinta edición cabe destacar el esfuerzo de investigadores del área de física, química, matemáticas, mecánica y particularmente del área civil con varias investigaciones sobre el comportamiento del asfalto y de mezclas asfálticas, todos ellos desean compartir y contrastar resultados con la comunidad científica y que sirva al conjunto de la sociedad en general.

El equipo de edición, los investigadores y el Comité editor, han venido trabajando para dar continuidad a la Revista Ciencia y Tecnología y tienen el firme propósito de cumplir con los diferentes requisitos y convertirla, en ésta próxima gestión, en una Revista indexada de reconocimiento internacional, asegurando sacar dos ediciones al año, donde no solo participen investigadores de esta casa de estudios, sino también muchos otros investigadores como los investigadores “junior” con importantes aportes científicos de sus proyectos de investigación de grado, seleccionados por sus sociedades científicas y carreras.

M.Sc. Ingrid Vicky Trigo Rocha
Coordinadora del Comité Científico

ÍNDICE

Artículos Científicos

Análisis de sensibilidad de un modelo numérico de clima en alta resolución para el estudio de precipitación y temperatura en Bolivia

Marko Andrade, Jorge E. Nava, Rocio Guzmán, Edgar Tejerina 9

Análisis de la metodología para la selección de sitios potenciales de emplazamiento de pequeñas centrales hidroeléctricas en Bolivia (Proyecto HYPOSO)

Galo Muñoz, Roberto Jiménez, Andrés Gonzales 21

Dando prioridad al mantenimiento de segmentos de canales agrícolas con el Proceso Analítico Jerárquico

Daniel B. Aviles, Andrés S. Gonzales 34

Estudio del comportamiento físico-reológico de asfalto convencional modificado con diferentes porcentajes de polvo de caucho reciclado

Fernando Melendres, Jahel S.Ledezma 42

Formulación de mortero autonivelante usando cenizas de cascarilla de arroz como agregado inorgánico y anhidrita, mediante el diseño de mezclas

Juan Alcón, Wilson Aguilar, Miguel Gonzales, Christian Nina 50

Influencia de la adición de pavimento asfáltico reciclado en el desempeño a la humedad y deformación permanente de mezclas asfálticas

Juan Olivera, Jahel S. Ledezma 59

Optimización del desempeño de mezclas asfálticas en caliente mediante la incorporación de aditivo mejorador de adherencia a base de organosilanos

Juan Sandagorda, Jahel S. Ledezma 68

Artículo de Divulgación

Búsqueda de dígitos en secuencia de números naturales

Rimer Zurita 79





Artículos Científicos

Análisis de sensibilidad de un modelo numérico de clima en alta resolución para el estudio de precipitación y temperatura en Bolivia

Marko Andrade^{1,2,*}, Jorge E. Nava^{1,2}, Rocio Guzmán^{1,2}, Edgar Tejerina^{1,2}

¹Centro de Monitorio Climático, Departamento de Física, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

²Proyecto de Hidroclimatología, Departamento de Física, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*markoandrade.u@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

Se realizó un experimento de sensibilidad en modelación numérica de clima usando RegCM 4.7.0 para cuantificar la habilidad de cinco modelos climáticos de reproducir los regímenes espaciotemporales de precipitación y temperatura en Bolivia para el periodo 2005 – 2015. Los modelos corrieron en el clúster computacional de alto rendimiento de la UMSS con una reducción de escala desde 70 km (modelo global) hasta 5 km (modelo regional de alta resolución) pasando por reducciones intermedias de 30 y 10 km. Cada modelo fue evaluado en dos dominios espaciales: uno que comprende la totalidad del territorio boliviano y otro que comprende solo el departamento de Cochabamba. Los parámetros estudiados fueron la resolución espacial, la resolución temporal, el esquema de parametrización convectiva, la microfísica de nubes y la capa límite planetaria. Se pudo apreciar que el esquema de convección es el parámetro dominante, tanto para precipitación como para temperatura. La contrastación de los modelos se realizó con el producto de reanálisis ERA5, habiéndose encontrado que, para la región Cochabamba, el esquema convectivo de Tiedtke es el que tiene el mejor rendimiento tanto en precipitación como en temperatura. En cuanto al dominio Bolivia, el modelo con mejor desempeño para temperatura es de nuevo Tiedtke, pero para la precipitación se observó que el esquema convectivo Grell-Emanuel, combinado con el esquema de microfísica Nogherotto – Tompkins tiene un desempeño superior. El resultado de este trabajo representa una mejora importante en comparación con modelaciones previas en el área de estudio, y fue posible gracias a la capacidad de cómputo provista por el clúster de alto desempeño recientemente instalado en la UMSS.

Palabras clave: *Estudio de sensibilidad, Modelo climático regional, Climatología Bolivia, Temperatura superficial, Precipitación.*

Abstract

A sensitivity experiment in numerical climate modeling was carried out using RegCM 4.7.0 to quantify the ability of five climate models to reproduce the spatiotemporal precipitation and temperature regimes in Bolivia for the period 2005 – 2015. The models ran on the computational cluster of high performance of the UMSS with a scale reduction from 70 km (global model) to 5 km (high resolution regional model) passing through intermediate reductions of 30 and 10 km. Each model was evaluated in two spatial domains: one that covers the entire Bolivian territory and another that covers only the department of Cochabamba. The parameters studied were spatial resolution, temporal resolution, convective parameterization scheme, cloud microphysics, and planetary boundary layer. It was possible to appreciate that the convection scheme is the dominant parameter, both for precipitation and temperature. The contrasting of the models was carried out with the ERA5 reanalysis product, having found that, for the Cochabamba region, the Tiedtke convective scheme is the one that has the best performance in both precipitation and temperature. Regarding the Bolivia domain, the model with the best performance for temperature is once again Tiedtke, but for precipitation it was observed that the Grell-Emanuel convective scheme, combined with the Nogherotto-Tompkins microphysics scheme, has a superior performance. The result of this work represents an important improvement compared to previous modeling in the study area, and was possible thanks to the computing capacity provided by the high-performance cluster recently installed at UMSS.

Key words: *Sensitivity study, Regional climate model, Climatology of Bolivia, Surface temperature, Precipitation.*

1. Introducción

Desde su lanzamiento, originalmente en 1989, el modelo climático RegCM ha sido estandarizado como uno de los más usados por diferentes conglomerados de simulación alrededor del planeta por su flexibilidad y confiabilidad. No obstante, debido a la gran complejidad de los cálculos y de las limitaciones en capacidad computacional, los modelos globales y regionales disponibles llegan a tener una baja resolución temporal (por lo general se cuenta con un dato cada 3 horas) y baja resolución espacial (en general inferior a los 0.25° , alrededor de 25 km).

Tal como lo indican Soria-Auza, et.al. (2010), la calidad de los modelos climáticos que son utilizados en diferentes estudios influye mucho en los resultados a los que estos arriban. Es decir, un modelo climático impreciso puede conducir a apreciaciones futuras imprecisas. En el caso de Bolivia, la calidad de los modelos está sujeta a superar algunas dificultades como las que se menciona a continuación.

Para empezar, Bolivia es un país con muchos pisos ecológicos, con características climáticas diferentes y cuyas fronteras tienden a ser abruptas; esto dificulta la obtención de un único modelo para describir toda la región. Por este motivo, se suele realizar regionalizaciones con el fin de mejorar los resultados (Abadi, et. al., 2020), (Zamuriano, 2014).

El segundo problema tiene que ver con la información provista por modelos globales, los cuales tienen una resolución espacial de aproximadamente 25 km, que de ser utilizados sobre las principales ciudades de Bolivia arrojarían no más de 1 o 2 datos para describir regiones bastante extensas. Esto obliga a pensar en reducciones de escala para aumentar la data disponible.

Finalmente, mencionamos una región particular del territorio boliviano: el Chapare, en el trópico cochabambino, el cual tiene tasas de precipitación muy elevadas que lo convierten en una anomalía o “hot spot”. Este punto no es el único en Sud América, habiéndose reportado puntos similares en Ecuador (Laraque, et. al., 2007), Perú y Colombia. A pesar del conocimiento que se tiene respecto a esta zona, este es solo conocimiento empírico (Andrade, et. al. 2021), ya que no se cuenta con documentación respecto a este fenómeno, aunque diversas teorías respecto a la naturaleza del mismo se han postulado (Zamuriano, Brönnimann, 2017).

2. Materiales y métodos

Área de estudio y datos

Debido al requerimiento de gran capacidad de cómputo, los cálculos que se presentan se realizaron en el clúster computacional de la Universidad Mayor de San Simón, Neitor HPC (UMSS, 2021) usando el modelo climático regional RegCM del Centro Internacional de Física Teórica (ICTP, 2023).

Basados en las recomendaciones realizadas por el proyecto CORDEX y observando los resultados obtenidos por colectivos de simulación climática como los de Pareja, Franchito y Reyes (2021) y el de Maurya, et. al. (2018), se optó por elegir como datos de partida (globales) los del Reanálisis Era - Interim (EIN15) (ECMWF, s.f.); este catálogo provee datos de reanálisis con una resolución espacial de 0.75° (alrededor de 80 km).

Para obtener los mejores resultados posibles del experimento acorde a las capacidades computacionales disponibles, se optó por un periodo de 10 años de simulación, del 1 de enero de 2005 al 30 de diciembre de 2015, dejando los primeros seis meses de cada experimento como periodo de “spin up” del modelo (seis meses de datos no considerados en el análisis).

El “down-scaling” dinámico, o reducción de escala, se realizó de la siguiente manera con tres dominios y resoluciones como se explica a continuación:

- Resolución Continental, a 30 km, este dominio se construyó de manera que incluyese la totalidad del continente sudamericano.
- Resolución Nacional, a 10 km, se construyó para albergar la totalidad del territorio boliviano.
- Resolución Departamental, a 5 km, contempla la totalidad del departamento de Cochabamba.

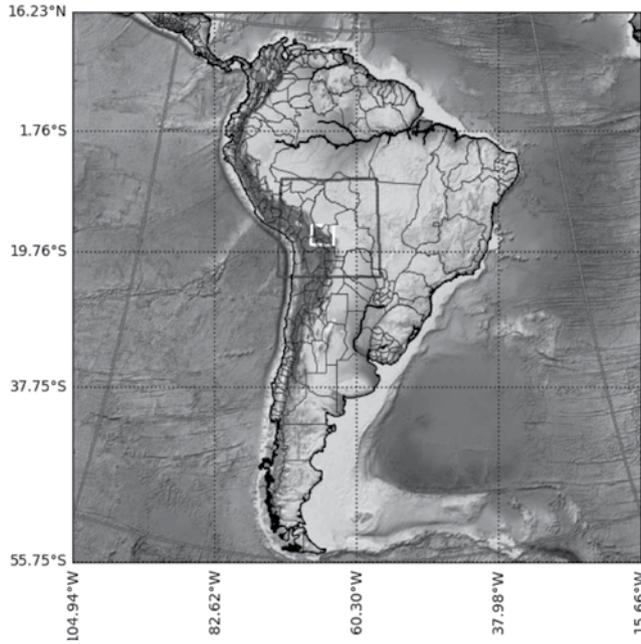


Figura 1. Dominios elegidos para el experimento de sensibilidad.

Caracterización de los modelos

Cada resolución fue replicada en cinco modelos diferentes denominados “sensit01” al “sensit05” con las características que se muestran en la Tabla 1. Las diferencias entre cada modelo radican en la parametrización convectiva, el esquema de microfísica de nubes y la parametrización de la capa límite planetaria. También fue necesario cambiar la resolución temporal para que exista consistencia con la reducción de escala espacial. Esta, sin embargo, fue idéntica en los cinco modelos por lo que no se la considera para fines de comparación.

Sobre la contrastación de resultados

Se optó por utilizar los datos de reanálisis ERA5 (ECMWF, 2023); dicho conjunto de datos representa una mejora respecto a la generación anterior (EIN15), brindando datos con una resolución espacial de 0.25° (alrededor de 25 km) que son mucho más realistas para representar la climatología de Bolivia que su predecesor.

Tabla 1

Características de los modelos usados en el experimento

Experimento	Resolución Espacial (km)	Resolución Temporal (s)	Esquema Convectivo en Tierra	Esquema Convectivo en Océano	Esquema de Microfísica de Nubes	Esquema de Límite Planetario
sensit01	30	30	Grell (Grell, et.al., 1991)	Emanuel (Emanuel, Živković - Rothman, 1999)	SUBEX (Pal, et. al., 2000)	Holtslag (Beljaars, et. al., 1990)
	10	10				
	5	5				
sensit02	30	30	Emanuel (Emanuel, Živković - Rothman, 1999)	Grell (Grell, et.al., 1991)	SUBEX (Pal, et. al., 2000)	Holtslag (Beljaars, et. al., 1990) UW (McCaa, Bretherton, 2004)
	10	15				
	5	10				
sensit03	30	30	Tiedtke (Tiedtke, 1996)	Tiedtke (Tiedtke, 1996)	SUBEX (Pal, et. al., 2000)	Holtslag (Beljaars, et. al., 1990)
	10	15				
	5	10				
sensit04	30	25	Grell (Grell, et.al., 1991)	Kain (Kain, Fritsch, 1990) (Kain, 2004)	SUBEX (Pal, et. al., 2000)	Holtslag (Beljaars, et. al., 1990)
	10	10				
	5	3				
sensit04	30	30	Grell (Grell, et.al., 1991)	Emanuel (Emanuel, Živković - Rothman, 1999)	Nogherotto - Tompkins (Nogherotto, et. al., 2012)	Holtslag (Beljaars, et. al., 1990)
	10	15				
	5	5				

3. Resultados y discusión

Lo primero que puede evidenciarse es que la resolución espacial de los modelos afecta mucho al resultado: resoluciones bajas no captan correctamente la topografía de la zona de estudio. Focalizando

el análisis en el departamento de Cochabamba, queda claro que los modelos tienen que ser de alta resolución porque de otro modo no logran percibir cambios altitudinales bruscos como los que se tiene al pasar del valle central al altiplano, cordillera y trópico departamental.

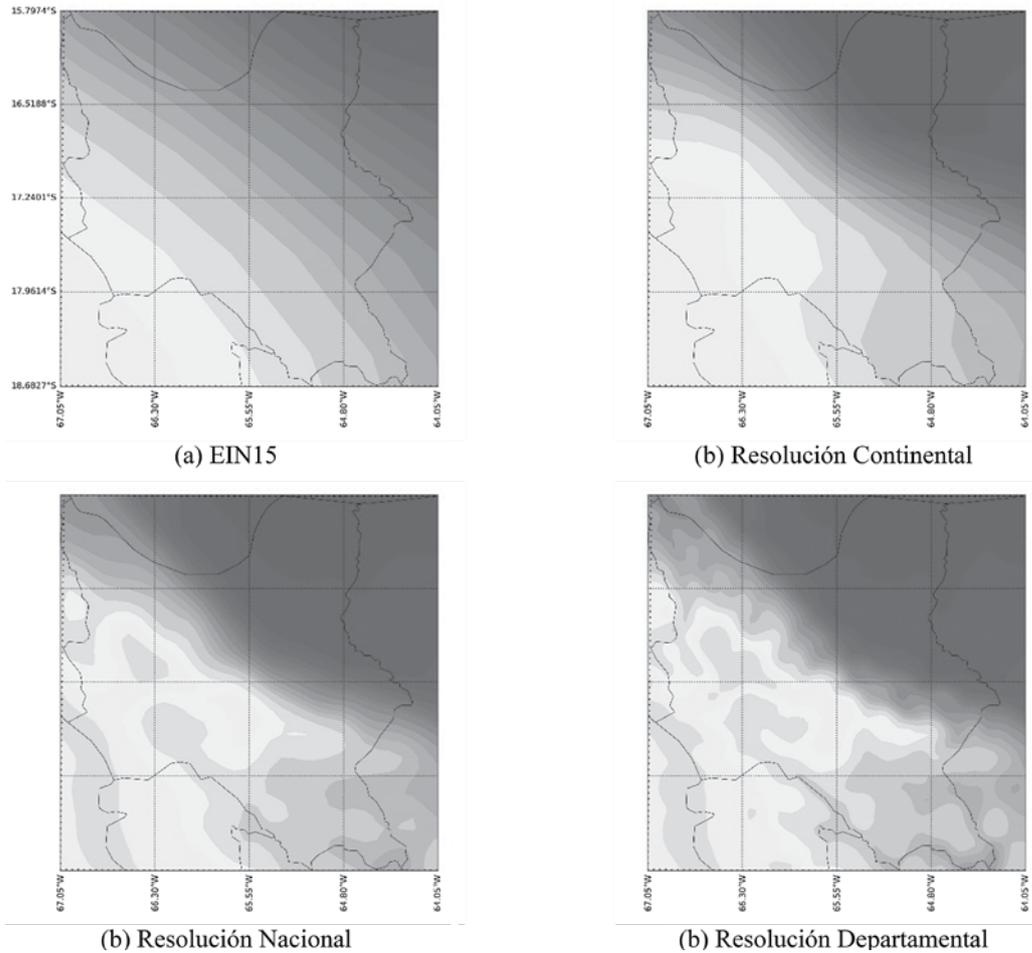


Figura 2. Topografía detectada por los modelos a diferentes resoluciones.

Análisis en alta resolución para el dominio Cochabamba

Se estudió la habilidad de los modelos de reproducir el patrón de precipitación en el departamento, especialmente para la época de lluvia que va de noviembre a marzo y prestando mayor atención a la zona de transición subandina-trópico (Chapare) antes mencionada.

Como primer criterio de comparación se presenta la evolución temporal del promedio mensual de

precipitación, en toda la región, para los cinco modelos vs. los datos de reanálisis. Ver Figura 3. Las series temporales muestran que los modelos lograron replicar el comportamiento de la precipitación, con un mínimo en la época de estiaje (junio-julio) y un aumento progresivo hasta alcanzar sus valores máximos entre los meses de diciembre y enero. Destaca sensit03 como el mejor modelo, seguido por sensit02 y sensit05. Los restantes modelos se descartan por no tener buena concordancia con la base de referencia (sobreestiman la precipitación).

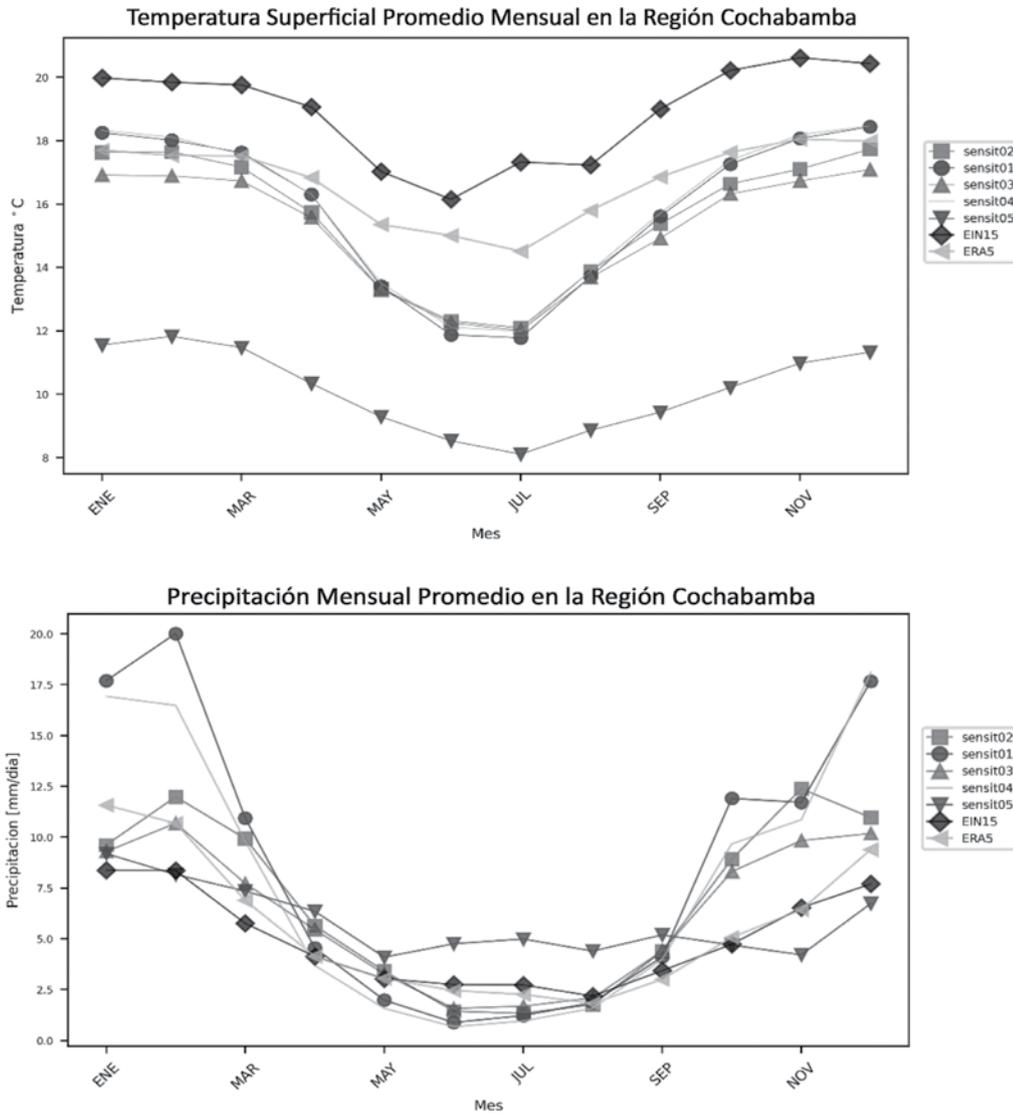


Figura 3. Comparación de los valores de precipitación mensual promedio y temperatura superficial promedio en Cochabamba.

Como segundo análisis se estudió la variación espacial de la precipitación y la temperatura. En esta ocasión se optó por separar el análisis en época húmeda y época seca, obteniendo el sesgo (o “bias”) sobre toda la región versus los datos de reanálisis para ambas variables. Las distribuciones espaciales de los sesgos se hallan en la Figura 4. Se muestra el resultado de solo los 3 mejores modelos, siendo consistentes con el primer análisis que descartó a los otros 2.

En cuanto a la precipitación durante la época de lluvia, es notable que los tres modelos tienden a sobreestimar en las regiones próximas al límite subandino-tropical del departamento, aunque lo

hacen en diferente grado. Esta sobreestimación de los modelos es previsible debido al cambio altitudinal brusco que se comentó previamente.

Se observa que el modelo sensit02 es eficiente al determinar la precipitación en la región del cono sur cochabambino y en la región noreste del departamento, no obstante, la sobreestimación subandino-tropical es mayor que en los otros modelos. Al contrario, el modelo sensit05 muestra una menor sobreestimación en el límite subandino-tropical, pero a costa de una subestimación de la lluvia en el resto del departamento. En promedio, se puede apreciar que sensit03 hace predicciones más acertadas si se

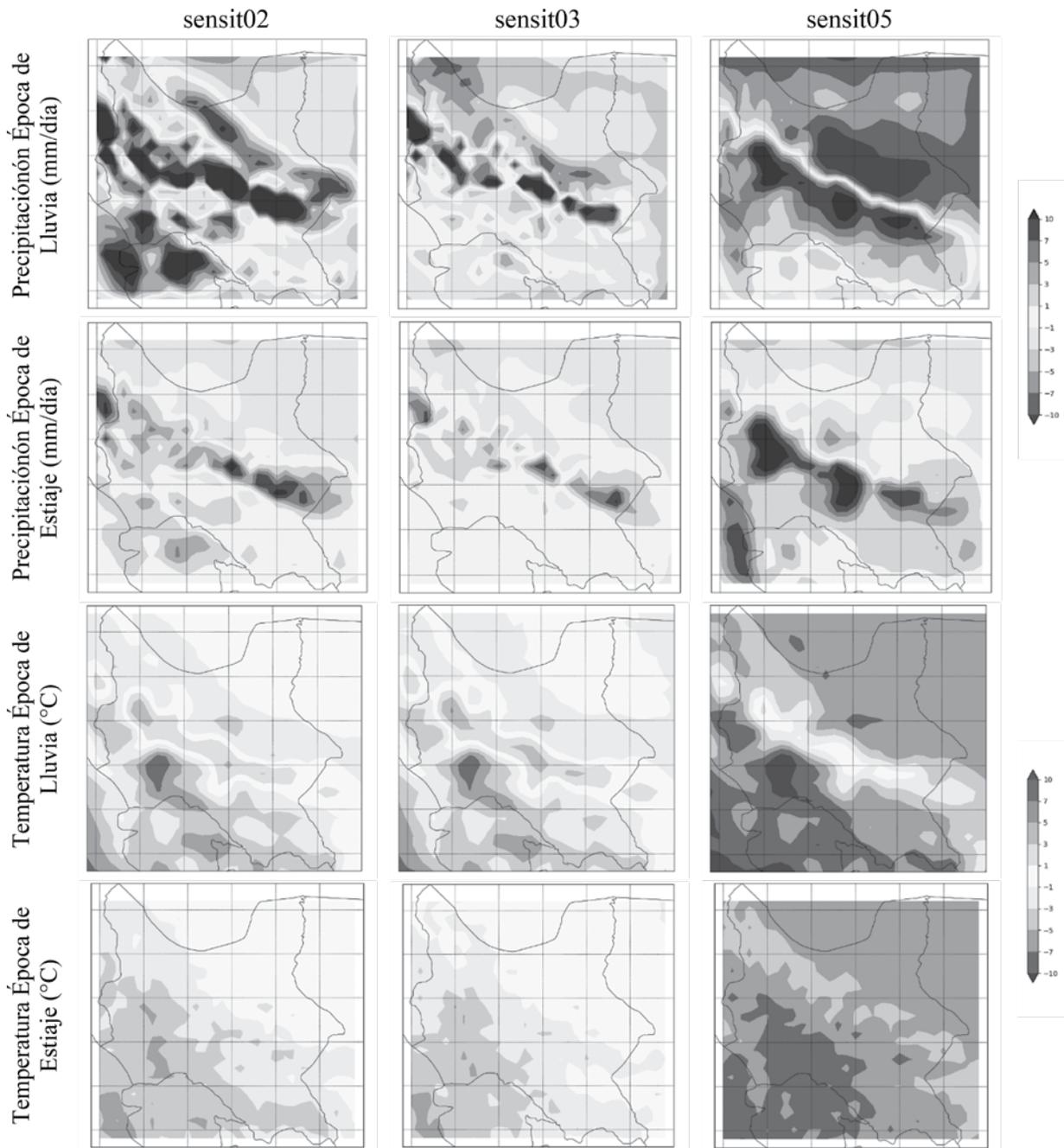


Figura 4. Distribución espacial del sesgo (“bias”) de las variables analizadas en el departamento de Cochabamba.

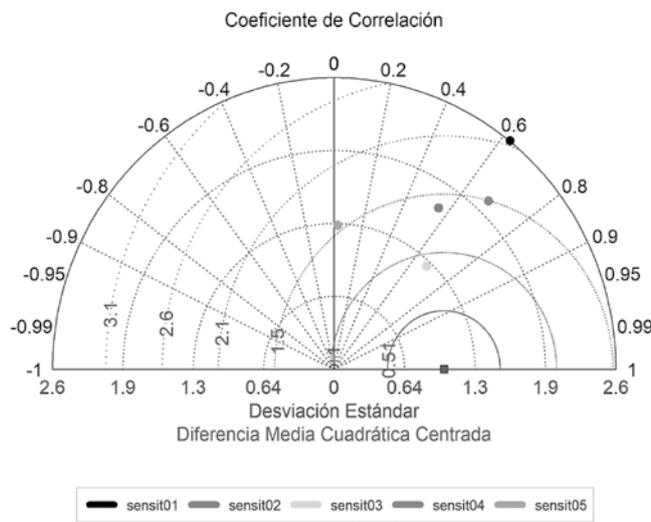
considera a todo el departamento. Esta es una nueva evidencia de que un solo modelo no sería capaz de captar correctamente el régimen de precipitación, incluso en un dominio departamental.

Por el lado de la temperatura en superficie, se confirma lo que mostraba la evolución temporal, con un modelo sensit05 bastante por debajo de la base de referencia y una diferencia especialmente notable en la región subandina del departamento. Ante esta situación, se

puede decir que un ajuste de parámetros en sensit05 (corrección de sesgo) podría ser la solución para aprovechar su buena correlación y acercarlo aún más a la realidad. Los otros dos modelos tienen mayor similitud en temperatura comparado con la base de reanálisis, y guardan una alta correlación entre sí.

Una forma de sintetizar todos los resultados mostrados hasta aquí es por medio de un Diagrama de Taylor (2001) (ver Figura 5). De este, se pueden verificar los

Diagrama de Taylor de Precipitación Anual para Cochabamba Con Referencia a ERA5 en el Periodo de Estudio



Precipitación Acumulada Anual Promedio Cochabamba

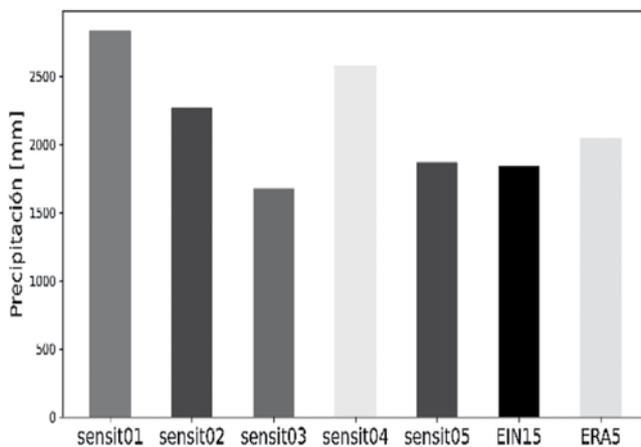


Figura 5. Diagrama de Taylor y diagrama de barras de la precipitación total acumulada anual en Cochabamba.

comportamientos descritos anteriormente, notando que sensit03 es el modelo más adecuado para describir, en promedio, la precipitación en el departamento de Cochabamba, ya que puede reproducir los datos de reanálisis con una diferencia media del orden de la unidad, un coeficiente de correlación entre 0.6 y 0.7, convirtiéndolo en el modelo que mejor se acerca a los datos de referencia. Como prueba adicional, se adjuntan los diagramas de barras con precipitación acumulada, dando nuevamente a sensit03 como el

mejor modelo en promedio para el departamento de Cochabamba. Esto de la pauta de que en posteriores estudios se concentren los esfuerzos en mejorar sensit03 mediante un ajuste fino (“tunning”) de sus parámetros.

Análisis en resolución intermedia para el dominio Bolivia

Al observar la evolución temporal de los resultados en la escala nacional, no se distinguió ningún modelo para eliminarlo a priori. Es por esto que en la Figura 6 se muestran las distribuciones del sesgo para los cinco modelos y para las dos variables climáticas. A esta escala, recién se hace notorio que tanto sensit01 como sensit04 no son capaces de reproducir adecuadamente la precipitación, pues gran parte del territorio presenta una sobreestimación, motivo por el cual son nuevamente descartados. A pesar de esto, no deja de ser significativo el buen desempeño regional de estos modelos “descartados” para el promedio nacional pero que en la Amazonía beniana y en la región del Altiplano mejoran significativamente, por lo que podrían ser utilizados en futuros estudios focalizados en tales regiones de Bolivia.

De la observación de sensit02 y sensit03 a esta escala, se evidencia que se produjo una sobreestimación significativa de lluvia en época húmeda en la región fronteriza entre la región subandina y la cordillera oriental, coincidiendo con Salamanca (2008). En cuanto a la temperatura en superficie, se hizo evidente que ambos modelos estiman adecuadamente los valores medios, notando que las diferencias más significativas se encuentran fuera del territorio nacional. Pasando a sensit05, se puede señalar que a nivel de precipitación en época de lluvia es el que más tiende a acercarse a los datos de reanálisis, con una discrepancia en la región de Chapare que podría resolverse con un ajuste fino de parámetros. Al contrario, con la temperatura se hace claro que este modelo es con mucho el que más se aleja de las observaciones, dando valores muy por debajo de los esperados en toda la región de estudio.

A partir de estas observaciones, es que se puede deducir que, a diferencia de lo logrado con la escala departamental, al parecer no será posible tener un único modelo para la descripción de ambas variables. Considerando además que los resultados en estiaje fueron consistentes entre los modelos, se

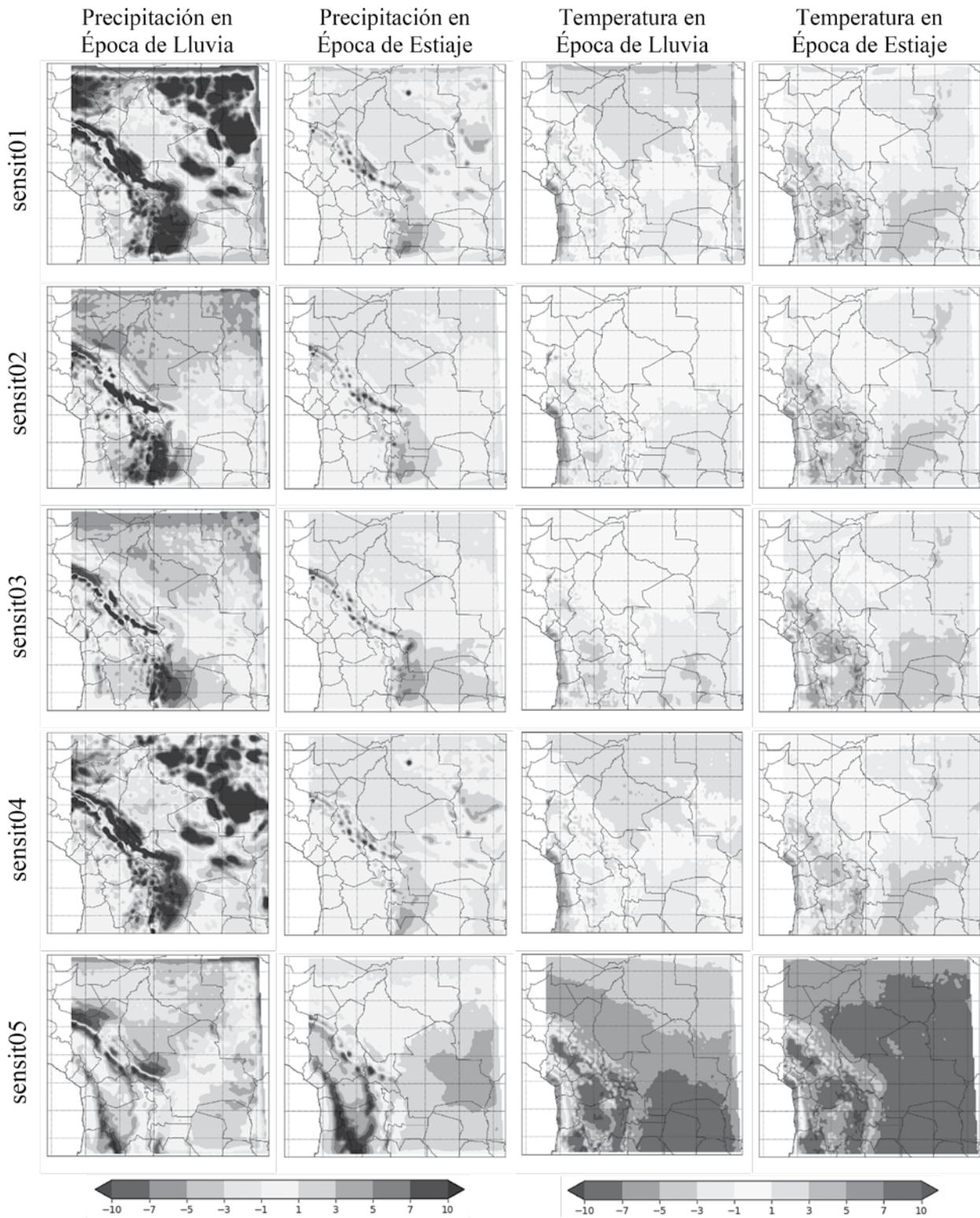


Figura 6. Distribución espacial del sesgo de precipitación y temperatura en el dominio Bolivia.

opta por realizar el análisis estadístico a partir de los Diagramas de Taylor para la época de lluvias en el periodo de análisis (ver Figura 7).

Por la parte de la temperatura, es evidente que sensit05 es el modelo que más se aleja de las mediciones tal como se había notado anteriormente. Los demás

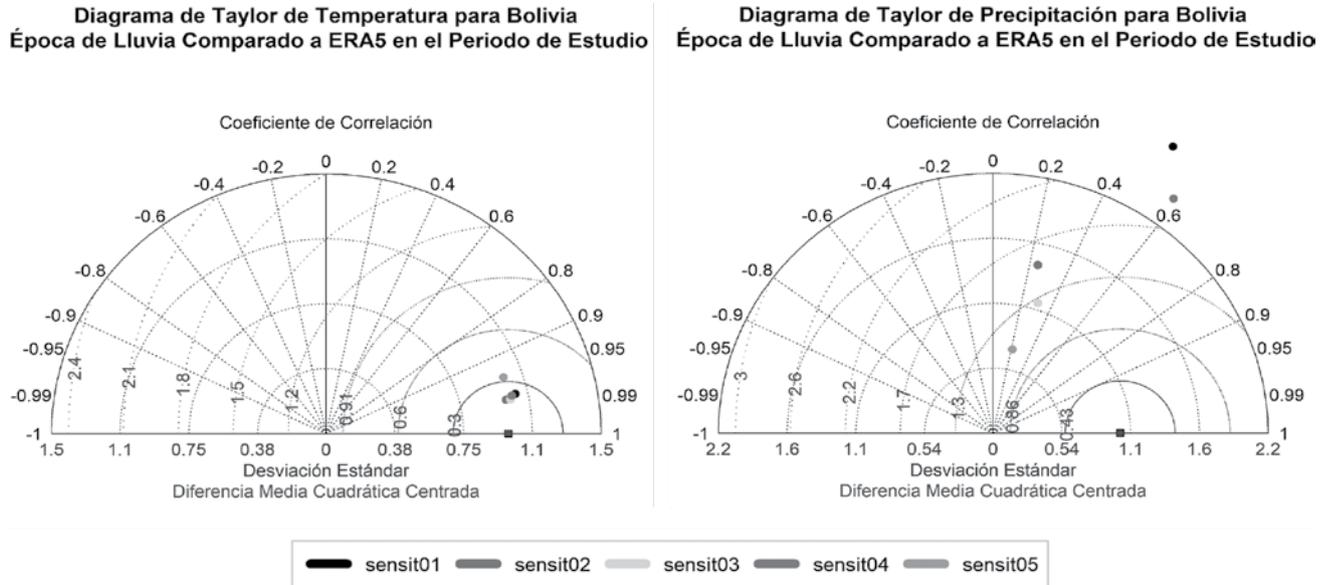


Figura 7. Diagramas de Taylor para la precipitación y temperatura superficial en el territorio boliviano.

modelos parecen mostrar un comportamiento muy similar entre ellos, aunque es notable que los más cercanos (por una pequeña diferencia) a los datos de reanálisis llegan a ser sensit02 y sensit03; llegando a tener un coeficiente de correlación en el orden de 0,99. Al cuantificar las diferencias medias cuadráticas, es que finalmente se observó que, en temperatura superficial, sensit03 es el modelo de mejor desempeño en el territorio nacional.

Pasando al análisis en el caso de la precipitación, es notable que ninguno de los tres modelos de mayor consistencia supera una correlación de 0,3; esto debido a las significativas áreas de discrepancia que

se observaron. Entre estos, sensit03 logra un valor superior, aunque lo hace a costo de incrementar su error medio hasta superar el orden de la unidad. Sumando lo bien que logra reproducir la distribución espacial de los resultados, es que se puede ver que sensit05 es el modelo que tuvo mejor desempeño, aunque una serie de ajustes son necesarios para mejorar los resultados.

4. Discusión

Los hallazgos de este trabajo pueden encontrarse resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2

Resumen de resultados del análisis de sensibilidad

Escala	Modelo Recomendado	Observaciones
Departamental (resolución alta, 5 km)	Tiedtke - Tiedtke	Modelo apto para la descripción de precipitación y temperatura.
Nacional (resolución intermedia, 10 km)	Tiedtke - Tiedtke	Modelo óptimo para describir la temperatura.
	Grell – Emanuel + Nogherotto - Tompkins	Modelo óptimo para describir la precipitación.

Con base en los resultados de los experimentos numéricos, se pudo notar claramente que tres configuraciones destacan sobre los demás por su capacidad de representar la climatología del área de estudio. Asimismo, fue muy evidente que la resolución

espacial juega un papel importante en los resultados, pues el modelo que mejor representó ambas variables a nivel Cochabamba, no lo hizo de la misma manera para el territorio boliviano en su totalidad.

De esta manera, se notó que, al centrarse en el departamento de Cochabamba, el modelo sensit03 que corresponde al esquema convectivo de Tiedtke (Tiedtke, 1989) (Tiedtke, 1993), aplicado tanto en tierra como en océano, es por mucho el más adecuado para representar el brusco cambio altitudinal que se encuentra en la frontera entre la región subandina y el trópico del departamento.

No obstante, al cambiar la escala a una menor resolución para abordar el dominio nacional, se evidenció que sensit03 bajaba su calidad de representación de la precipitación, con lo que puede comprobarse efectivamente la ganancia que se obtiene de la mejora de resolución en los modelos climáticos. Esto se contrasta al comparar los resultados con el conjunto de datos de partida (EIN15); se observaron diferentes fenómenos que no se percibían a la escala original.

A esta escala, se pudo ver la capacidad de Tiedtke como esquema convectivo; especialmente a la hora de reproducir la temperatura media en superficie; de modo que se optó por elegirlo como el modelo de temperatura a esta escala. No obstante, se pudo notar que el esquema combinado Emanuel en tierra y Grell en océano se encontraba bastante cerca de Tiedtke en ambas variables. Al comparar los resultados de este experimento con los de la escala departamental, se puede ver que para esta parametrización el esquema de límite planetario UW (Bretherton, et. al., 2004) permite una reducción significativa del error medio. Por tanto, se recomienda que en un futuro trabajo se pueda combinar este con el esquema de Emanuel (Emanuel, Živković-Rothman, 1999) en tierra y el esquema de Grell (Grell, et.al., 1991) en el océano para contrastar con los resultados de este trabajo.

Por el lado del modelo regional de precipitación en la escala Bolivia, finalmente, los resultados conllevaron a elegir la combinación del esquema mixto Grell en tierra y Emanuel en océano; trabajando en conjunto con el esquema de Noghrotto – Tompkins de microfísica de nubes como el modelo adecuado para la descripción. Este mostró ser particularmente el modelo que más problemas tiene para captar las variaciones de temperatura superficial; por tanto, es recomendable hacer un experimento más tanto con este modelo como con Tiedtke para determinar si es posible decantarse por alguno de los dos como único modelo para el estudio de precipitación y temperatura en Bolivia.

Por otra parte, se recomienda ampliar este estudio, usando los datos de ERA5 como base de datos de entrada para el modelo, de modo que se pueda verificar si los datos de reanálisis llevan a una mejoría de los resultados.

Por la capacidad de los modelos de reproducir las condiciones observadas, se hace evidente que se pueden usar estos esquemas para hacer predicciones a corto y largo plazo para la región; y se recomienda realizarlo en un futuro estudio.

Finalmente, destacamos que el resultado de este trabajo representa una mejora importante en comparación con modelaciones previas en el área de estudio, y fue posible gracias a la capacidad de cómputo provista por el clúster de alto desempeño recientemente instalado en la UMSS.

5. Referencias bibliográficas

- Abadi, A. M., Rowe, C. M., y Andrade, M. (2020). *Climate regionalization in Bolivia: a combination of non-hierarchical and consensus clustering analyses based on precipitation and temperature. International Journal of Climatology*, 40(10), 4408-4421. <https://doi.org/10.1002/joc.6464>
- Andrade M., Terrazas, J., y Guzmán, R. (2021). Homogeneización de series mensuales de temperatura y precipitación en Bolivia a partir de registros SENAMHI entre 1980 y 2015. *Ciencia y Tecnología*, 1 (13), 78-86.
- Beljaars, A. C. M., Holtslag, A. A. M., y Turkenburg, W. C. (1990). *Diabatic wind speed profiles in coastal regions: comparison of an internal boundary layer (IBL) model with observations. Boundary-layer meteorology*, 51, 49-75. <https://doi.org/10.1007/BF00120461>
- Bretherton, C. S., McCaa, J. R., y Grenier, H. (2004). *A new parameterization for shallow cumulus convection and its application to marine subtropical cloud-topped boundary layers. Part I: Description and 1D results. Monthly weather review*, 132(4), 864-882. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0864:ANP FSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0864:ANP FSC>2.0.CO;2)

- ECMWF. (s.f.). *ECMWF Reanalysis - Interim (ERA-Interim)*. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Recuperado de: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-interim>
- ECMWF. (2023). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Recuperado de: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
- Emanuel, K. A., y Živković-Rothman, M. (1999). *Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(11), 1766-1782. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<1766:DAEOAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1766:DAEOAC>2.0.CO;2)
- Grell, G. A., Kuo, Y. H., y Pasch, R. J. (1991). *Semiprognostic tests of cumulus parameterization schemes in the middle latitudes*. *Monthly weather review*, 119(1), 5-31. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<0005:STOCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<0005:STOCP>2.0.CO;2)
- ICTP. (2023). RegCM. Trieste, Italia: *International Centre for Theoretical Physics*. Recuperado de: <http://clima-dods.ictp.it/regcm4/>
- Kain, J. S., y Fritsch, J. M. (1990). *A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization*. *Journal of Atmospheric Sciences*, 47(23), 2784-2802. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2)
- Kain, J. S. (2004). *The Kain-Fritsch convective parameterization: an update*. *Journal of applied meteorology*, 43(1), 170-181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
- Killeen, T. J., Douglas, M., Consiglio, T., Jørgensen, P. M., y Mejia, J. (2007). *Dry spots and wet spots in the Andean hotspot*. *Journal of Biogeography*, 34(8), 1357-1373. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01682.x>
- Laraque, A., Ronchail, J., Cochonneau, G., Pombosa, R., y Guyot, J. L. (2007). *Heterogeneous distribution of rainfall and discharge regimes in the Ecuadorian Amazon basin*. *Journal of hydrometeorology*, 8(6), 1364-1381. <https://doi.org/10.1175/2007JHM784.1>
- Maurya, R.K.S., Sinha, P., Mohanty, M.R. y Mohanty, U.C. (2018). *RegCM4 model sensitivity to horizontal resolution and domain size in simulating the Indian summer monsoon*. *Atmospheric Research*, 210, 15-33. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.010>
- McCaa, J. R., y Bretherton, C. S. (2004). *A new parameterization for shallow cumulus convection and its application to marine subtropical cloud-topped boundary layers. Part II: Regional simulations of marine boundary layer clouds*. *Monthly weather review*, 132(4), 883-896. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0883:ANPFSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0883:ANPFSC>2.0.CO;2)
- Nogherotto, R., Tompkins, A. M., Giorgi, F., y Coppola, E. (2012). *The new microphysic cloud scheme implemented in RegCM4*. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 8017). Recuperado de: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012EGUGA..14.8017N/abstract>
- Pal, J. S., Small, E. E., y Eltahir, E. A. (2000). *Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D24), 29579-29594. <https://doi.org/10.1029/2000JD900415>
- Pareja-Quispe, D., Franchito, S.H. y Fernandez, J.P.R. (14 agosto 2021). *Assessment of the RegCM4 Performance in Simulating the Surface Radiation Budget and Hydrologic Balance Variables in South America*. *Earth Syst Environ* 5, 499-518. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00249-y>
- Salamanca Mazuelo, L. A. (2008). *PROPUESTA PARA EL VI PLAN DE ACCIÓN DEL PROGRAMA DIPECHO*. Comisión Europea de Ayuda Humanitaria. Recuperado de: https://ec.europa.eu/echo/files/funding/opportunities/interest_dipecho6_bolivia.pdf
- Soria-Auza, R. W., Kessler, M., Bach, K., Barajas-Barbosa, P. M., Lehnert, M., Herzog, S. K., y Böhner, J. (2010). *Impact of the quality of climate*

- models for modelling species occurrences in countries with poor climatic documentation: a case study from Bolivia. Ecological Modelling*, 221(8), 1221-1229. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.01.004>
- Taylor, K. E. (2001). *Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. Journal of geophysical research: atmospheres*, 106(D7), 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Tiedtke, M. (1989). *A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. Monthly weather review*, 117(8), 1779-1800. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2)
- Tiedtke, M. (1993). *Representation of clouds in large-scale models. Monthly Weather Review*, 121(11), 3040-3061. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<3040:ROCI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<3040:ROCI>2.0.CO;2)
- Tiedtke, M. (1996). *An extension of cloud-radiation parameterization in the ECMWF model: The representation of subgrid-scale variations of optical depth. Monthly weather review*, 124(4), 745-750. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1996\)124<0745:AEOCRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124<0745:AEOCRP>2.0.CO;2)
- Universidad Mayor de San Simón. (2021). neitor. Cochabamba, Bolivia: Universidad Mayor de San Simón. Recuperado de <https://neitor.umss.edu.bo/>
- Zamuriano, M., y Brönnimann, S. (2017, Abril). *Numerical investigations with WRF about atmospheric features leading to heavy precipitation and flood events over the Central Andes' complex topography. In EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 12551). Recuperado de: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..1912551Z/abstract>

Análisis de la metodología para la selección de sitios potenciales de emplazamiento de pequeñas centrales hidroeléctricas en Bolivia (Proyecto HYPOSO)

Galo Muñoz^{1*}, Roberto Jiménez¹, Andrés Gonzales¹

¹Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*g.munoz@umss.edu

Resumen

Bolivia cuenta con un gran potencial para la generación de energía hidroeléctrica, la cual puede contribuir significativamente al desarrollo económico y social, así como a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la diversificación de la matriz energética. La identificación de nuevos sitios para proyectos hidroeléctricos es un desafío que requiere una gran cantidad de información y visitas frecuentes a lugares a veces inaccesibles. En este contexto, esta investigación propone una metodología que utiliza imágenes satelitales y datos geoespaciales para preseleccionar sitios de interés hidroeléctrico, integrando factores clave mediante análisis multivariado en un SIG (Sistemas de Información Geográfica). Tras aplicar esta metodología a Bolivia, se identificaron 74 sitios con alto potencial, de los cuales 10 se destacan por su excelente calificación técnica y ambiental.

Palabras clave: *SIG, Análisis multivariado, Energía hidroeléctrica.*

Abstract

Bolivia has great potential for hydroelectric power generation, which can significantly contribute to economic and social development, as well as the reduction of greenhouse gas emissions and the diversification of the energy matrix. The identification of new sites for hydroelectric projects is a challenge that requires a large amount of information and frequent visits to sometimes inaccessible locations. In this context, this research proposes a methodology that uses satellite imagery and geospatial data to preselect sites of hydroelectric interest, integrating key factors through multivariate analysis in a GIS. After applying this methodology in Bolivia, 74 high-potential sites were identified, of which 10 stand out for their excellent technical and environmental ratings.

Key words: *GIS, Multivariate analysis, Hydroelectric power.*

1. Introducción

Bolivia posee un amplio potencial para el desarrollo de proyectos de energía hidroeléctrica, aprovechando sus abundantes recursos hídricos. Si se lleva a cabo este tipo de aprovechamiento, no solo se estaría contribuyendo al desarrollo económico y social del país, sino que también generaría energía limpia y sostenible en un contexto mundial marcado por el cambio climático, alineándose así con las metas y compromisos establecidos en la Contribución Nacional Determinada (NDC) en Bolivia (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2022).

La generación de energía hidroeléctrica a partir del agua de los ríos ofrece una forma de aprovechar una fuente de energía renovable, lo que, a su vez, contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la conservación del medio ambiente. Además, el uso de energías renovables como la hidroeléctrica ayuda a diversificar la matriz energética del país, reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables y promoviendo la seguridad energética (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2022).

En Bolivia, los recursos hídricos aprovechables para la generación de energía eléctrica se encuentran principalmente en la faja del subandino y en los llanos

orientales. En el subandino, los ríos presentan grandes desniveles topográficos favorables, pero caudales relativamente pequeños, mientras que, en los llanos orientales, los ríos tienen pendientes mucho menores, pero transportan grandes caudales. Ambas condiciones son convenientes para la generación hidroeléctrica, aunque con diferentes ventajas dependiendo de diversos factores que se analicen como topografía, geología, distancia a los centros poblados, etc.

La empresa estatal de generación de electricidad en Bolivia, ENDE (Empresa Nacional de Electricidad), tiene como propósito diversificar la matriz energética del país y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Para lograrlo, están estudiando proyectos alternativos a las termoeléctricas, como la producción de electricidad a partir de energía eólica, geotérmica, fotovoltaica e incluso biomasa. Sin embargo, la hidroeléctrica sigue siendo una de las opciones más importantes.

En este estudio, se busca identificar nuevos sitios potenciales para la construcción de proyectos hidroeléctricos de diversas escalas. Las zonas más prometedoras se encuentran en el subandino, con ríos que tienen capacidad para generar centrales hidroeléctricas de hasta 50 MW de potencia. Esto se respalda en la experiencia de ENDE en la ejecución de obras de esta magnitud y en la disponibilidad de ingeniería y tecnología de construcción bien establecidas.

En la búsqueda de nuevos sitios, además de los ya existentes, se enfrentan desafíos. La primera etapa suele ser la identificación de aquellos lugares con una oferta potencial de agua y condiciones topográficas favorables, esta actividad se la realiza a partir del estudio de mapas del Instituto Geográfico Militar. Posteriormente, se realiza una evaluación in situ por parte de expertos en hidrología, hidráulica, geología, geotecnia y medio ambiente. Luego, se lleva a cabo el estudio de prefactibilidad técnica, económica y ambiental respectivo (Leyland, 2014). El número de sitios preseleccionados influye en el costo y tiempo de la investigación de factibilidad, por lo que, se confía en el buen criterio de expertos para reducir la cantidad de sitios a investigar.

Este artículo de investigación formula una metodología para preseleccionar sitios de interés hidroeléctricos de potencias menores a 50 MW, pero empleando información deducible a partir de

imágenes satelitales complementadas con mapas cartográficos, geológicos, uso de suelo, información de hidrología y de áreas protegidas, para ser posteriormente procesadas con técnicas de análisis multivariado, técnicas que son implementadas en un sistema de información geográfica. Al utilizar técnicas de análisis multivariado, se busca integrar y ponderar adecuadamente estos factores para obtener una evaluación más precisa de la conveniencia de cada sitio.

2. Métodos

En esta investigación se consideran las centrales hidroeléctricas de pasada (Run of River, RoR), entendidas como los esquemas de aprovechamiento que derivan directamente el caudal que corre por el río no teniendo embalses para el almacenamiento del agua (European Small Hydropower Association, 2006). Estas centrales son concebidas para trabajar sobre todo durante las horas pico de la demanda, por esta razón, ellas están sujetas a las variaciones estacionales de caudal resultando en una generación variable de electricidad (International Finance Corporation, 2015; Mosonyi, 1991). Una zona montañosa se presenta favorable porque el recurso hídrico captado por una toma de agua construida a cierta cota topográfica en el río, puede ser conducido por canal contorneando las curvas de nivel hasta un sitio en que por su elevación y cota del río crean un salto de agua suficiente para generar energía eléctrica. Por ello, es requisito básico disponer del relieve topográfico del área de estudio. La investigación extendió su cobertura a todo el país utilizando una imagen base DEM obtenida de la página <https://asf.alaska.edu/> (ALOSPALSAR DEM) con resolución de 30 m x 30 m. La imagen fue procesada con la extensión *ArchHydro* de ESRI para establecer la red de drenaje, la generación de redes de flujo, la identificación de subcuencas y la delimitación de las cuencas hidrográficas de Bolivia.

De la página de GeoBolivia de la Vicepresidencia del país (<http://geo.gob.bo/portal/>) se han descargado mapas digitales pertinentes. Los mapas fueron agrupados en dos factores: Factores Técnicos y Factores Ambientales. Los Factores Técnicos comprenden a los Factores Físicos que incluyen mapas de formaciones geológicas del país, geología estructural y mapa de amenazas por deslizamientos; los Factores Espaciales que comprende la red vial y de comunicación y mapas de división administrativa

y de centros poblados. Los Factores Ambientales incluyen mapa de áreas protegidas, mapas de flora, fauna y ecosistemas de tratamiento especial, mapas de territorio, actividades económicas y centros poblados. Adicionalmente, se trabajaron con mapas de ubicación de estaciones climáticas (precipitación, temperatura, dirección de vientos y humedad), estaciones hidrométricas (registro de caudales en ríos) y se generaron mapas de distancias a subestaciones eléctricas, comunidades y potenciales sitios de generación. La información necesaria de caudales en la red hidrográfica fue calculada a partir de los caudales específicos estimados para cada subcuenca, caudales que figuran en el documento “Balance Hídrico Superficial de Bolivia” (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2017) editado por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua del Estado Plurinacional de Bolivia y sus mapas digitales.

El potencial hidroeléctrico que se podría generar entre dos puntos de una conducción de agua, fue calculado con la ecuación (Mosonyi, 1991; Ramos, 2000 y Ortiz, 2011):

$$P_i = \gamma \times Q_i \times H_i \quad (1)$$

Donde P_i (kW) representa el potencial hidroeléctrico global generado entre dos puntos (nodos) de interés en el río; γ es el peso unitario del agua (kN/m³); Q_i el caudal medio multianual (m³/s) y H_i el salto bruto o desnivel topográfico entre los dos puntos de interés. La potencia anterior corresponde a un valor teórico que no considera las pérdidas de energía del fluido ni la eficiencia de la turbo maquinaria de aprovechamiento.

Se define como mil metros la distancia entre los dos nudos descritos. La red de drenaje del país fue segmentada en tramos de esa longitud. Estos puntos fueron extraídos con ArcGIS y conformaron una capa adicional del DEM del proyecto deduciéndose las elevaciones de cada uno de los nodos utilizando la herramienta *Spatial Analyst de ArcGIS*. Los extremos de cada tramo son candidatos para alojar la obra de captación sobre el río y alojar a la casa de máquinas; el desnivel entre los nodos del tramo constituirá el salto bruto del aprovechamiento. El análisis iterativo del conjunto de posibles saltos en la red fluvial, ponderado por los factores técnicos y ambientales, permitió encontrar el tramo más ventajoso de la

propuesta. La ponderación de los factores citados se realizó aplicando el análisis multicriterio a las variables geoespaciales descritas y a la producción de energía eléctrica de cada sitio. En la lógica del análisis, algunos factores llegan a tener mayor o menor importancia que otros, por lo que, se ponderaron mapa a mapa para configurar un mapa resultado de esa valoración. La Figura 1 presenta la metodología de la ponderación de mapas.

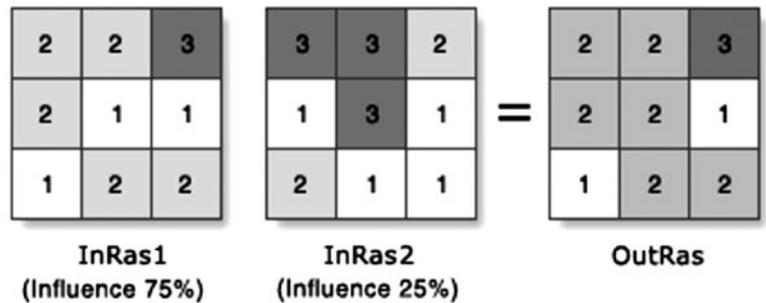


Figura 1. El mapa raster OutRas es el resultado de la suma del mapa de ingreso InRas1 con el InRas2, cada uno ponderados por los factores de 0.75 y 0.25 respectivamente. El valor resultante es redondeado al entero más cercano. Fuente: ESRI (2017)

Las variables para la valoración de las restricciones técnicas para un sitio candidato para aprovechamiento hidroeléctrico comprende las capas siguientes: Sitios de interconexión eléctrica (subestaciones, proyectos eléctricos, líneas de transmisión), vías de comunicación y red vial de Bolivia; capas en el SIG del proyecto, construidas a partir de los mapas de Geología, Amenaza de Inundación, Amenaza de Deslizamiento y Fallas Geológicas obtenidas de GeoBolivia.

Las capas de Sitios de Interconexión y Vías se procesaron utilizando la herramienta Euclidean Distance de ArcGIS para obtener una capa ráster que califica la distancia de un potencial sitio de generación con respecto a la cercanía a una subestación y a la cercanía a poblaciones. La Tabla 1 presente la valoración adoptada de la literatura especializada (Cornare, 2016) para calificar la cercanía de un sitio de interés potencial de generación hidroeléctrica hasta la subestación más cercana. El valor 1 expresa una calificación muy restrictiva debido a la lejanía a un sitio de interconexión; mientras que el valor de 10 expresa una calificación totalmente favorable por la cercanía que presenta el sitio de interconexión para zonas de desarrollo hidroeléctrico.

Tabla 1

Calificación de la cercanía (km) de un aprovechamiento eléctrico hasta una subestación

Distancia	<25	25 a 50	50 a 75	75 a 100	100 a 125	125 a 150	150 a 175	175 a 200	200 a 225	>225
Calificación	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Fuente: Cornare (2016)

La Tabla 2 presenta la calificación de la cercanía del potencial sitio de generación eléctrica a las vías de comunicación terrestre conformadas por carreteras principales y secundarias. Mientras más lejano quede el sitio de aprovechamiento hidroeléctrico de un camino (valor 1) más dificultoso y costoso será para la construcción de una central; en contraposición (valor 10) cuanto más cercana quede una vía principal, más favorable resultará el mencionado sitio (Gracia, 2014).

Tabla 2

Calificación de la cercanía (km) de un aprovechamiento eléctrico a un camino secundario

Distancia	<0.5	0.5 a 1	1 a 2	2 a 3	3 a 5	5 a 7	7 a 10	10 a 15	15 a 20	>20
Calificación	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Fuente: Gracia (2014)

Para la Formación Geológica, factor muy importante, se propone evaluar en función a la naturaleza de la roca y su resistencia en términos geotécnicos para soportar cargas exteriores. La literatura específica, como Gonzales de Vallejo (2002) permitió elaborar la Tabla 3 para calificar al macizo rocoso y su ventaja como fundación de las obras hidráulicas, las estructuras y la casa de máquinas de la central hidroeléctrica. El numeral 1 describe a una formación muy poco favorable, mientras que el máximo valor de 10 refleja inmejorables condiciones de soporte.

Tabla 3

Calificación de la formación geológica como basamento del aprovechamiento hidroeléctrico

Roca intacta	Resistencia a compresión simple (mPa)		Clase	Calificación
	Valores medios	Rango de valores		
Andesita	210-320	100-500	R5	9
Anfibolita	280	210-530	R5	9
Anhidrita	90	80-130	R4	8
Arenisca	55-140	30-235	R4	8
Basalto	150-215	80-350	R5	9
Caliza	80-140	60-200	R4	8
Cuarcita	200-320	100-500	R5	9
Diabasa	240-350	130-365	R5	9
Diorita	180-245	120-335	R5	9
Dolerita	200-300	100-350	R5	9
Dolomía	90-250	65-350	R4	8
Esquisto	50-60	20-160	R4	8
Gabro	210-280	180-300	R5	9
Gneiss	160-200	85-250	R5	9
Granito	170-230	100-300	R5	9
Grauvaca	180	80-220	R5	9
Limolita	-	35-250	R3	5
Lutita	30-70	10-100	R3	5
Marga	70-140	70-190	R4	8
Mármol	120-200	60-50	R5	9
Pizarra	100-180	90-250	R5	9
Sal	12	5-30	R2	3
Toba	0	10-46	R2	3
Yeso	25	10-40	R2	3

Fuente: Gonzales de Vallejo (2002)

El análisis de la Geología Estructural consideró la presencia de fallas en el terreno, fallas que impedirían la viabilidad técnica del emplazamiento del aprovechamiento hidroeléctrico. A partir de datos propuesto por Cornare (2016) se compuso la Tabla 4 que califica la presencia y ausencia de fallas en una escala numérica.

Tabla 4

Calificación de la geología estructural según la presencia de fallas geológicas

Tipo	Falla	Falla inferida	Lineamiento	Zona sin falla
Calificación	2	4	6	10

Fuente: Cornare (2016)

Para la ponderación del mapa de amenaza de deslizamiento, se recurrió a los criterios de Rojas & Arismendi (s. f.) que figuran en la Tabla 5. Los valores de la Tabla 5 señalan el numeral 1 para aquellas zonas que presentan mayor peligro de deslizamiento del terreno y 10 para aquellas zonas donde es muy poco probable la ocurrencia de un deslizamiento del terreno según el mapa obtenido.

Tabla 5

Calificación de la amenaza a deslizamiento

Amenaza	Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy baja	Sin amenaza
Calificación	1	2	4	6	8	10

Fuente: Rojas & Arismendi (s. f.)

Para el mapa de Amenaza de Inundación se adoptó la orientación de Cornare (2016) mostrada en la Tabla 6. En ella, el valor 1 califica a una zona restrictiva constituida por llanuras aluviales y un valor de 10 calificación favorable para las zonas donde no existe amenaza de inundaciones.

Tabla 6

Calificación del riesgo por inundación

Nivel del riesgo	Nivel de riesgo	Calificación
Llanuras aluviales de inundación ocasional	10	1
Planicies de inundación permanente	9	2
Planicies de inundación ocasional a estacional	8	3
Planicies de inundación estacional a permanente	7	4
Torrenteras	6	5
Planicies de inundación ocasional	5	6
Zona sin amenaza	0	10

Fuente: Cornare (2016)

La Tabla 7 presenta la ponderación relativa de cada variable técnica frente a las otras. (Romero, 2018)

Tabla 7

Valores de ponderación a los mapas de los factores técnicos

Factor	Influencia (%)	Variable	Peso (%)
Factores físicos	50	Formaciones geológicas	50
		Geología estructural	25
		Amenaza por movimiento de deslizamiento	10
		Riesgo por inundación	15
Factor espacial	50	Distancia a Infraestructura vial existente	50
		Distancia a sitios de interconexión o subestaciones	50

Fuente: Romero (2018)

Por otra parte, se incorpora la evaluación de las restricciones ambientales en el análisis multivariado. Las restricciones ambientales pueden hacer inviable el proyecto o simplemente encarecerlo. La inviabilidad se refleja en atención a la normativa ambiental del país. En este caso se consideraron tres tipos de variables:

- Restricciones ambientales.
- Componente abiótico.
- Componente socioeconómico.

Las restricciones ambientales hacen referencia a toda aquella restricción de cualquier índole ambiental y, estando reglamentada, no es posible hacer ningún desarrollo de infraestructura, a menos que tenga destino exclusivo para aprovechamientos hidroeléctrico como en este caso. En base a experiencias pasadas y revisión literaria se elaboró la Tabla 8:

Tabla 8

Calificación de las restricciones ambientales normativas

Área Protegida	Categoría	Base Legal	Calificación
Apolobamba	Área Natural de Manejo Integrado Nacional	DS 10070 del 07/01/1972 - DS 25652 del 14/01/2000	3
Aguarague	Área Natural de Manejo Integrado	DL 2083 del 20/04/2000	3
Amboró	Área Natural de Manejo Integrado	DS 11254 del 20/12/1973 - DS 20423 del 16/08/1984 - DS 22939 del 11/10/1991 DS 24137 del 03/10/1995	3
Kaa-iyá del Gran Chaco	Área Natural de Manejo Integrado	DS 24122 del 21/09/1995	4
Madidi	Área Natural de Manejo Integrado	DS 24123 del 21/09/1995	3
El Palmar	Área Natural de Manejo Integrado	DS 24623 del 20/05/1997	3
Otuquis	Área Natural de Manejo Integrado	DS 24762 del 31/07/1997	3
Iñaño	Área Natural de Manejo Integrado	Ley No. 2727 del 28 de mayo de 2004	2
San Matías	Área Natural de Manejo Integrado	SD 24734 del 31/07/1997	3
Cotapata	Área Natural de Manejo Integrado	DS 23547 del 09/07/1993	3
Noel Kempff Mercado	Parque Nacional	DS 16646 del 28/06/1979 - Ley 978 del 04/03/1988 - DS 21997	1
Toro Toro	Parque Nacional	DS 22269 del 26/07/1989 - Ley 1370 del 13/11/1992	1
Carrasco	Parque Nacional	DS 22940 del 11/10/1991 - RM 157-86 del 22/04/1986 - RM 381/88 del 09/12/1988	1
Otuquis	Parque Nacional	DS 24762 del 31/07/1997	3
Tunari	Parque Nacional	DS 6045 del 30/03/1962 - Ley 253 del 04/11/1963 - DS 15872 del 06/08/1978 _ 1262 del 13/09/1991__	1
Sajama	Parque Nacional	SD s/n del 02/08/1939 - Ley s/n del 05/11/1945	1
Isiboro Securo	Parque Nacional y Territorio Indígena	DL 7401 del 22/11/1965 - DS 22610 del 24/09/1990 - RR CDF RN 012/90	1
Cordillera de Sama	Reserva Biológica	DS 22721 del 30/01/1991	1
Pilón Lajas	Reserva de la Biosfera y Territorio Indígena	DS 23110 del 09/04/1992	1
Estación Biológica del Beni	Reserva de la Biosfera	DS 19191 del 05/10/1982 DS 22611 del 24/09/1990	1
Eduardo Avaroa	Reserva Nacional de Fauna Andina	DS 11239 del 13/12/1973 - DS 19313 del 14/05/1981 - SD 18431 del 26/06/1981	1
Tariqua	Reserva Nacional de Flora y Fauna	DS 22277 del 02/08/1989 - Ley 1328 del 23/04/1992	1
Manuripi	Reserva Nacional de Vida Silvestre Amazónica	DS 11252 del 20/12/1973	1
Zona sin área protegida			10

Fuente: (GeoBolivia, s.f.)

La evaluación de cada uno de los parámetros ambientales, de la misma manera que en la evaluación técnica, se calificó entre valores de 1 a 10, siendo 1 el valor totalmente restrictivo ambientalmente (ausencia de normativa legal que permita el desarrollo hidroeléctrico) y 10 el valor más favorable para la zona donde no exista área protegida, ecosistemas estratégicos o coberturas boscosas. A partir de la revisión bibliográfica se elaboró la Tabla 9:

Tabla 9

Calificación componente biótico

Clasificación Tipo de Bosque	Calificación
Bosque amazónico	5
Bosque andino	8
Bosque chaqueño	9
Bosque chiquitano	6
Bosque seco interandino	9
Bosque tucumano - boliviano	7
Bosque de llanura inundable	4
Bosque pantanal	7
Bosque de yungas	6
Zona sin Bosque	10

Fuente: (GeoBolivia, s.f.)

Se ha considerado el bosque como el más favorable de los hábitats para la biota, a pesar de que bofedales y praderas por encima de los 4000 msnm son también ambientes para la vida; sin embargo, por la profusión de vida en los bosques, se consideró a ellos como elemento representativo para la evaluación. La Tabla 9 presenta valores entre 5 a 10 donde el valor de 10 presenta zonas sin bosques. A medida que la profusión de bosques crece, la calificación decrece.

En las restricciones del componente socioeconómico se pueden encontrar los siguientes elementos a considerar:

- Centros poblados
- Población a reasentar
- Presencia de comunidades indígenas.

Como última variable se obtuvo la siguiente tabla para el componente socioeconómico:

Tabla 10

Calificación de la distancia del sitio de la central con respecto a centros poblados

Rango de distancias (km)	Calificación
≤ 0,5	10
0,51 – 1	9
1,01 – 2	8
2,01 – 3	7
3,01 – 5	6
5,01 – 7	5
7,01 – 10	4
10,01 – 15	3
15,01 – 20	2
> 20	1

Fuente: Alfonso, Medina & Corredor (s. f.)

La asignación de peso a los centros poblados, se presenta según la tabla anterior en base a la distancia que existe entre zonas de desarrollo potencial hidroeléctrico y comunidades, centros poblados o municipios. Como resultado de la evaluación de la variable del componente socioeconómico, se tienen las calificaciones entre rango de 1 a 10, siendo el 1 una calificación casi restrictiva debido a que la distancia hacia un centro poblado es muy lejana y el valor de 10 una calificación totalmente favorable por la cercanía que presenta hacia un centro poblado, comunidad o municipio. Los factores de ponderación de las variables ambientales se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11

Factores de ponderación de la calificación de las restricciones ambientales

Factor	Influencia	Variable	Peso
Restricciones normativas (RAN)	40	Área Natural de Manejo Integrado Nacional	100
		Área Natural de Manejo Integrado	
		Parque Nacional	
		Parque Nacional y Territorio Indígena	
		Reserva Biológica	
		Reserva de la Biosfera y Territorio Indígena	
		Reserva de la Biosfera	
		Reserva Nacional de Fauna Andina	
		Reserva Nacional de Flora y Fauna	
Reserva Nacional de Vida Silvestre Amazónica			
Componente abiótico (CA)	30	Bosque Amazónico	100
		Bosque Andino	
		Bosque Chaqueño	
		Bosque Chiquitano	
		Bosque Seco Interandino	
		Bosque Tucumano - Boliviano	
		Bosque de Llanura Inundable	
		Bosque Pantanal	
Bosque de Yungas			
Zona sin Bosque			
Componente Socioeconómico (Cs)	30	Presencia de comunidades indígenas	100
		Cabeceras Municipales	
		Centros Poblados	

Fuente: Romero (2018)

La evaluación general de las restricciones ambientales se realizó de acuerdo a revisiones especializadas de expertos en el área, obteniéndose los pesos ponderados requeridos. Aplicando los factores de ponderación se tiene como resultado un solo mapa de evaluación de variables ambientales para zonas de desarrollo hidroeléctrico potencial.

La intersección de capas del factor técnico y el factor ambiental da como resultado zonas aptas para desarrollo hidroeléctrico para su posterior emplazamiento de una central hidroeléctrica.

La evaluación general para los pesos ponderados se presenta en la Tabla 12 según revisiones bibliográficas:

Tabla 12

Factores de ponderación de la calificación de los factores técnicos y ambientales

Factor	Peso
Factor técnico	50%
Factor ambiental	50%

Fuente: (Romero, 2018)

Con los mapas y las tablas de ponderación para cada uno de los factores, se obtienen los sitios más promisorios para el emplazamiento de una central hidroeléctrica.

Finalmente, en la Figura 3 y en la Tabla 13 se muestran los diez mejores sitios para implementar centrales hidroeléctricas de pasada.

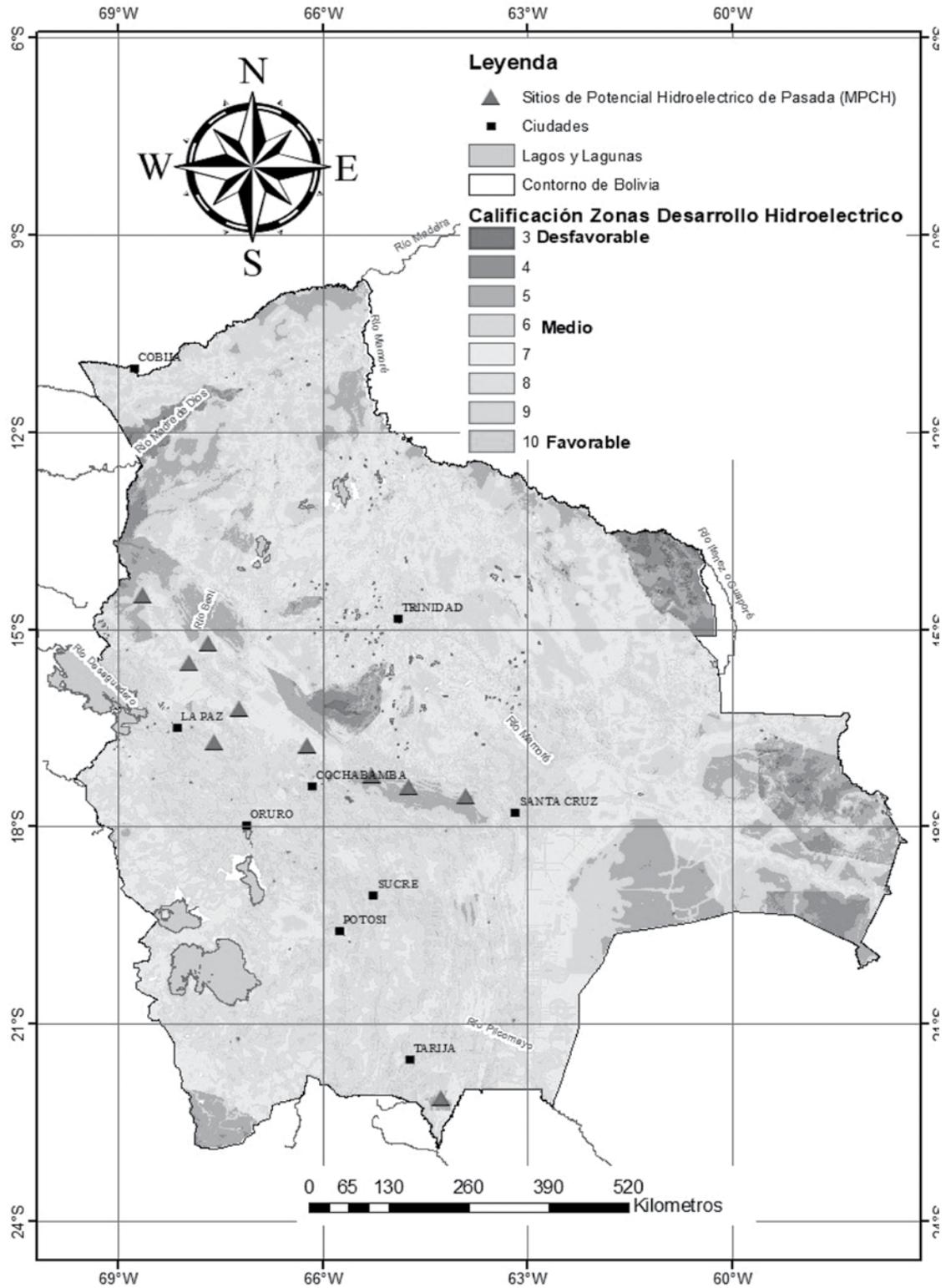


Figura 3. Diez mejores sitios para emplazar un aprovechamiento hidroeléctrico de pasada en la geografía de Bolivia, resultado de la aplicación de la metodología de análisis multivariado propuesto en esta investigación.

Tabla 13

Los diez mejores sitios para emplazar una central hidroeléctrica de pasada, según la metodología del análisis multivariado propuesto en la investigación

ID	Obra de Toma		Casa de Máquinas		Calificación de mayor a menor	Potencia (MW)	Departamento	Provincia
	Coordenada Este	Coordenada Norte	Coordenada Este	Coordenada Norte				
269	690691	8206326	691258	8206863	9	49.3	La Paz	Sud Yungas
322	649853	8150712	650096	8151611	9	13.8	La Paz	Loayza
94	794813	8143568	795706	8143656	8	19.3	Cochabamba	Ayopaya
393	612652	8283066	613032	8283669	8	8.02	La Paz	Larecaja
235	538647	8397316	539278	8397948	7	37.04	La Paz	Franz Tamayo
278	641363	8315443	641746	8316284	7	42.4	La Paz	Larecaja
81	403782	8059200	404122	8060038	6	11.3	Santa Cruz	Ichilo
143	367872	7551320	368669	7551020	6	20.8	Tarija	Arce
198	315366	8075376	314778	8076105	6	38.6	Cochabamba	Carrasco
302	258937	8094508	258096	8094651	6	18.8	Cochabamba	Tiraque

Como se puede observar, los diez sitios encontrados se hallan en la faja subandina de la cordillera oriental. De los cinco mejores, cuatro están en el departamento de La Paz y uno en Cochabamba. Si se implementasen los cinco sitios, se estaría incrementando -en conjunto- en 127 MW de energía al Sistema Interconectado Nacional. Por ejemplo, una de las centrales hidroeléctricas del país es el proyecto San José I y San José II y que tienen una potencia instalada conjunta de 124 MW, el proyecto hidroeléctrico Misicuni tiene 80 MW y Banda Azul 69 MW. La comparativa de estos números destacan la promisión de la metodología aquí formulada.

4. Conclusiones

En la presente investigación se recopiló y generó información geoespacial como mapas de elevación digital, cuencas hidrográficas, balance hídrico, redes de drenaje, formaciones geológicas, fallas geológicas, mapa de amenaza de inundación, amenaza de deslizamiento, infraestructura de interconexión eléctrica, vías secundarias, áreas protegidas, centros poblados y bosques. Como resultado de la aplicación de la metodología a Bolivia, se han determinado 500 posibles ubicaciones de medianas y pequeñas centrales hidroeléctricas (MPCH) de pasada que ofrecen diferentes niveles de producción energética. En forma específica, se han identificado los diez

más promisorios sitios para implementar centrales hidroeléctricas en el país (Figura 3 y Tabla 12).

Se considera que la herramienta desarrollada puede convertirse en un instrumento de apoyo para la toma de decisiones al momento de la selección de las mejores alternativas de un proyecto en una etapa temprana. Sin embargo, se la debe considerar como el primer paso para desarrollar una metodología más robusta y completa.

Se reconoce que la inclusión de nuevas variables técnicas y ambientales, así como una discusión exhaustiva de los factores de ponderación de cada mapa, proporcionaría una evaluación más certera de sitios factibles para el desarrollo hidroeléctrico.

Agradecimientos

Se agradece al Laboratorio de Hidráulica de la FCyT de la UMSS y al Proyecto HYPOSO quienes fueron gestores y apoyo para la realización de este estudio.

5. Referencias bibliográficas

Alfonso, D., Medina, P., & Corredor, J. (s. f.). *Aplicación de sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la determinación de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja*. Tunja: Tesis de Grado.

- Cornare. (2016). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Negro. Medellín - Colombia: Consorcio POMCAS.
- ESRI. (2017). ArcGIS. Obtenido de Superposición Ponderada (Spatial Analyst): [https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/weighted-overly.html](https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/weighted-overlay.html)
- European Small Hydropower Association. (2006). *Guía para el desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas*. Brussels - Belgium: European Renewable Energy Council.
- Gonzales de Vallejo, L. (2002). *Engineering rock mass classification: a complete manual for engineers*. Rosario - Argentina.
- Gracia. (2014). Aplicación de técnicas de análisis multicriterio a la localización óptima de extracciones de arenas y gravas en el entorno de Zaragoza. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 25 - 48.
- International Finance Corporation. (2015). *Hydroelectric Power*. Stuttgart - Germany: World Bank Group.
- Leyland, B. (2014). *Small Hydroelectric Engineering Practice*. London - England: Taylor & Francis Group. pag. 6.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2017). *Balance Hídrico Superficial de Bolivia*. La Paz - Bolivia: GIZ/PROAGRO.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2022). *Contribución Nacionalmente Determinada del Estado Plurinacional de Bolivia*. La Paz - Bolivia: MMAyA.
- Mosonyi, E. (1991). *Water Power Development - High Head Power Plants - Vol II/A*. Budapest - Hungary: akademiai Kiado.
- Ortiz, R. (2011). *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Bogotá - Colombia: Xpress Estudio Gráfico.
- Ramos, H. (2000). *Guidelines for Design of Small Hydropower Plants*. Belfast - North Ireland: Western Regional Energy Agency.
- Rojas, C., & Arismendi, J. (s.f.). *Análisis Multicriterio en SIG para la Prospección de Yacimientos Minerales Auríferos*. Bogotá - Colombia: Facultad de Ingeniería - Universidad Jose Caldas.
- Romero, A. (2018). *Metodología para Determinar el Potencial hidroeléctrico y la prefactibilidad Preliminar de Proyectos de Generación con SIG*. Zalzburgo - Austria: Universidad de Zalzburgo.

Dando prioridad al mantenimiento de segmentos de canales agrícolas con el Proceso Analítico Jerárquico

Daniel B. Aviles^{1,*}, Andrés S. Gonzales¹

¹Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*da.aviles@umss.edu

Resumen

Mantener los canales de drenaje agrícola en buen estado es vital para mantener la capacidad de producción de alimentos. Dado que muchos factores, como la erosión del suelo y el movimiento en masa, afectan las capacidades de funcionamiento de los canales de drenaje agrícolas, es necesario realizar un mantenimiento periódico. Decidir dónde se debe priorizar el trabajo de mantenimiento es una tarea desafiante. En este estudio, se utiliza el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para decidir dónde se debe enfocar el trabajo de mantenimiento. Los criterios considerados en el modelo AHP fueron: susceptibilidad a la erosión del suelo mediante el esfuerzo cortante crítico para la erosión, evidencias visuales de movimiento en masa, presencia/ausencia de depósitos de suelo en el canal principal y presencia/ausencia de vegetación establecida en los bancos del canal. El método se utilizó en una canal de drenaje agrícola previamente estudiado, donde los segmentos que necesitaban mantenimiento ya habían sido identificados mediante inspección visual respaldada por análisis de suelo de laboratorio. Los resultados muestran que el modelo AHP pudo proporcionar una clasificación de prioridad para los segmentos de canal que efectivamente necesitaban mantenimiento. El modelo AHP propuesto ofrece una forma consistente, adaptable y replicable de priorizar costosos trabajos de mantenimiento en segmentos de canales de drenaje agrícola.

Palabras clave: *Mantenimiento de canales de drenaje, Evaluación del estado funcional de canales, Erosión de suelos, Proceso Analítico Jerárquico.*

Abstract

Keeping agricultural drainage ditches properly functional is vital for maintaining food production capacity. Given that many factors, such as soil erosion and mass movement, affect the functioning capabilities of agricultural drainage ditches, they need to be periodically maintained. Deciding where maintenance work needs to be prioritized is a challenging task. Here, the Analytical Hierarchy Process (AHP) is used to decide where maintenance work should be focused. The criteria considered in the AHP model were: Soil erosion susceptibility by means of the critical shear stress for erosion, mass movement manifestations, presence/absence of soil deposits in the main channel and presence/absence of established vegetation in the channel banks. The method was used in a previously surveyed agricultural drainage ditch, where segments in need of maintenance were already identified by visual inspection backed with laboratory soil analysis. Results show that the AHP model was able to provide a priority ranking for the ditch segments in need of maintenance. The proposed AHP model provides a consistent, adaptable, and replicable way to prioritize costly maintenance works in agricultural drainage ditch segments.

Key words: *Ditch maintenance, Ditch functional status evaluation, Soil erosion, Analytical Hierarchy Process.*

1. Introducción

Las tierras agrícolas y los agricultores que trabajan en ellas tienen la tarea fundamental de garantizar la producción de alimentos para la humanidad. La calidad

de los cultivos puede depender en gran medida del adecuado manejo del drenaje. El manejo del drenaje incluye la importante tarea de mantener los canales de drenaje, para asegurar su adecuado funcionamiento. Además de asegurar la calidad de los cultivos,

cuando se mantienen adecuadamente, los canales de drenaje agrícolas pueden proporcionar servicios ecosistémicos, como recarga de aguas subterráneas, atenuación de inundaciones, purificación del agua y conservación de la biodiversidad (Needelman et al., 2007). Dado que los canales de drenaje agrícolas se degradarán con el tiempo debido a la acción de múltiples factores, como el agua (ya sea en forma de lluvia o flujo en el canal), que puede provocar procesos de erosión del suelo; movimientos en masa de las paredes laterales, que alterarán la geometría del canal (cambiando así sus propiedades hidráulicas); vegetación, dentro del canal o en los bordes del mismo (lo cual puede reducir su capacidad para transportar agua); entre otros, es necesario mantener los canales para restaurar o mejorar su función.

El mantenimiento de los canales de drenaje es costoso. Se estima que en Minnesota se gastan hasta 12 millones de dólares al año en el mantenimiento y limpieza de canales de drenaje (Magner et al., 2010). Dado el alto costo de los trabajos de mantenimiento, se han propuesto procedimientos como el Minnesota Agricultural Ditch Reach Assessment For Stability (MADRAS), que es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, para ayudar a identificar los segmentos de canales que requieren trabajos de mantenimiento (Aviles, Wesström y Joel, 2018; Joel, Wesström y Messing, 2015; Magner et al., 2010).

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) es una valiosa herramienta de apoyo para la toma de decisiones. A través de la generación de una estructura jerárquica, el AHP incluye un objetivo principal, varios criterios y subcriterios para evaluar dicho objetivo, y un conjunto de alternativas que se evalúan en función de los criterios y subcriterios (Saaty, 2008). Esta metodología ha sido ampliamente utilizada en diversas áreas de toma de decisiones. Por ejemplo, se ha empleado en la delimitación de zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas (Arshad et al., 2020), la determinación de zonas potenciales de aprovechamiento de aguas subterráneas (Ghosh et al., 2023), la delimitación de áreas sensibles a la desertificación (Kacem et al., 2021), la zonificación del potencial de erosión (Kabobah et al., 2021), la optimización de la cantidad de riego y la tasa de fertilización en cultivos (Wang et al., 2021), la evaluación del impacto de la sequía en el agua subterránea (Masroor et al., 2021), la evaluación de índices de calidad del agua (Mishra et al., 2022), la determinación de políticas de conservación de tierras (Setiawan et al., 2022), la zonificación del riesgo de

inundaciones (Dung et al., 2022; Parsian et al., 2021), la zonificación de la vulnerabilidad a la degradación de tierras (Tolche et al., 2022), la zonificación del uso potencial de la tierra para pastoreo, forestería y agricultura (Topuz, M y Deniz, M, 2023), y la zonificación de tierras para el desarrollo sostenible de la agricultura (Kumar et al., 2021), entre otros. Una fortaleza importante del AHP es la posibilidad de agregar/eliminar criterios en la jerarquía para adaptarse a las particularidades de los sitios de estudio.

Este trabajo se basa en los criterios empleados por MADRAS y presenta un modelo de decisión que utiliza el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) como una herramienta alternativa para respaldar la toma de decisiones en cuanto a la priorización de las necesidades de mantenimiento en segmentos de canales de drenaje agrícolas. El objetivo del trabajo es implementar el AHP, como procedimiento sólido y estructurado, para evaluar y asignar de manera eficiente los recursos de mantenimiento a los segmentos de canales que requieren mayor atención.

2. Materiales y métodos

2.1 El Análisis Jerárquico de Procesos (AHP)

El AHP requiere la definición de un objetivo, un conjunto de criterios, (opcionalmente) subcriterios y un grupo de alternativas. Estos se organizan en un árbol jerárquico, con el objetivo en la parte superior, seguido de los criterios y subcriterios en el medio, y las alternativas en la parte inferior. El objetivo, por lo tanto, es priorizar las necesidades de mantenimiento de los segmentos de los canales de drenaje. Los criterios utilizados para tomar la decisión se basaron en los criterios utilizados en MADRAS (Aviles et al., 2018; Joel et al., 2015; Magner et al., 2010) y son: i) Movimientos en masa observados/no observados, ii) presencia/ausencia de depósitos de suelo en el canal principal, iii) presencia/ausencia de vegetación en el canal principal, iv) presencia/ausencia de vegetación en las paredes laterales del canal y v) esfuerzo cortante hidráulico por encima/por debajo del esfuerzo cortante crítico para la erosión. Las alternativas son cada uno de los segmentos de zanjas que se van a evaluar.

Con el árbol de decisión jerárquica establecido, el siguiente paso es construir una matriz de comparación de pares entre los criterios propuestos para establecer los pesos de importancia relativa entre ellos. Esta comparación se realiza utilizando una escala, llamada escala fundamental, que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1
La escala fundamental del AHP

Intensidad de la importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos criterios contribuyen igualmente al objetivo
2	Débil	
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente un criterio sobre otro.
4	Moderada +	
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente un criterio sobre otro.
6	Fuerte +	
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Un criterio es fuertemente favorecido y su dominio se demuestra en la práctica.
8	Muy, muy fuerte	
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece un criterio sobre otro es del más alto orden de afirmación

Fuente: Saaty y Vargas (2013)

Las comparaciones de pares obtenidos utilizando la escala fundamental, se utilizan para construir la matriz de comparación, como se muestra en la Figura 1, donde cada fila y columna representan los criterios comparados entre sí. Un aspecto importante de la matriz de comparación es que, si el criterio *i* tiene un valor asignado según la escala fundamental al compararlo con el criterio *j*, entonces *j* tiene el valor recíproco al compararlo con *i*. Es decir, si se compara el criterio *i* (*C_i*) con el criterio *j* (*C_j*) y se asigna un valor $w_{i,j} = a$, según la escala fundamental, entonces la comparación de *C_j* con *C_i* dará como resultado el recíproco $w_{j,i} = 1/a$ (Saaty, 2008).

$$\begin{matrix}
 & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_n \\
 \begin{pmatrix}
 1 & w_{1,2} & w_{1,3} & \dots & w_{1,n} \\
 w_{2,1} & 1 & w_{2,3} & \dots & w_{2,n} \\
 w_{3,1} & w_{3,2} & 1 & \dots & w_{3,n} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 w_{n,1} & w_{n,2} & w_{n,3} & \dots & 1
 \end{pmatrix} & C_1 \\
 & C_2 \\
 & C_3 \\
 & \dots \\
 & C_n
 \end{matrix}$$

Figura 2. Matriz de comparaciones de pares. Los $w_{i,j}$ son los valores asignados según la escala fundamental de tal manera que si $w_{i,j} = a$, entonces $w_{j,i} = 1/a$ (Saaty, 2008).

Una vez completada la matriz de comparaciones de pares, los pesos relativos pueden obtenerse de forma exacta elevando la matriz a potencias grandes y luego sumando cada fila; estas sumas se dividen luego por la suma total de todas las filas. Un procedimiento aproximado consiste en sumar cada fila de la matriz y dividir por la suma total de todas las filas (Saaty 2001, 2008). Una vez obtenidos los pesos para cada criterio, se asigna a cada alternativa una puntuación según la escala de cada criterio. Luego se realiza una suma ponderada para obtener una puntuación total que permite clasificar las alternativas. Esta clasificación establece la prioridad para el mantenimiento, donde una puntuación más alta significa una mayor prioridad para el mantenimiento.

2.2. Sitio de estudio

Para probar el modelo AHP propuesto, se evaluó un canal de drenaje ubicado en Ultuna, una región de Uppsala, Suecia. Este canal de drenaje de seis kilómetros de longitud fue evaluado previamente utilizando MADRAS (Aviles Ribera 2020; Aviles et al. 2018; Joel et al. 2015), donde se evaluaron seis segmentos. El canal de drenaje se muestra en la Figura 2.

Según MADRAS, se asigna una puntuación entre 0 y 30 para cada segmento. Cuanto mayor sea la puntuación, más degradado estará el segmento de la zanja. MADRAS se utilizó considerando tres criterios (estabilidad de las banquetas, ensanchamiento excesivo/desgaste de las banquetas y deposición de sedimentos)

(Aviles et al., 2018; Joel et al., 2015). Los puntajes totales de MADRAS se muestran en la Tabla 2. Los puntajes de MADRAS establecen que los segmentos D y E están muy degradados y, por lo tanto, deben tener prioridad en el mantenimiento. El segmento C sería el siguiente en prioridad.

Tabla 2

Valoraciones obtenidas con MADRAS en la escala de 0 a 30. Valores grandes representan segmentos degradados

Criterio	Segmento					
	A	B	C	D	E	F
Estabilidad de las banquetas	0	5	5	10	10	*
Ensanchamiento excesivo/desgaste de las banquetas	3	3	10	10	10	*
Deposición de sedimentos	0	0	3	10	10	*
Total	3	8	18	30	30	*

* El segmento estaba extremadamente degradado y no se pudo realizar la evaluación.

Fuente: Aviles et al. (2018); Joel et al. (2015)

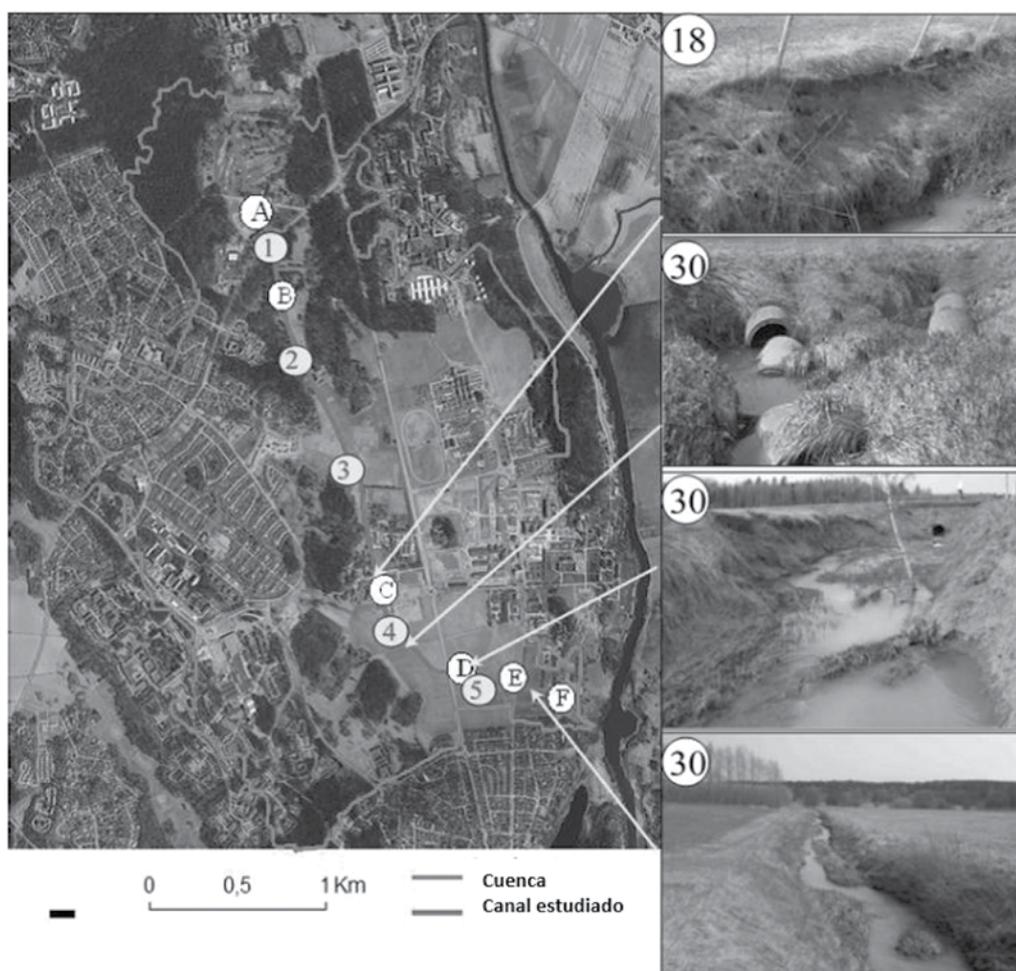


Figura 2. Canal de drenaje evaluado en Ultuna, Uppsala – Suecia. Las letras representan los segmentos del canal que fueron evaluados. Los números en círculos representan la valoración obtenida con MADRAS. Fuente: Aviles (2020); Aviles et al. (2018) y Joel et al. (2015).

3. Resultados y discusión

El primer paso fue construir el árbol de decisión jerárquico, tomando en cuenta los criterios propuestos

por MADRAS y dos criterios adicionales. El árbol de decisión resultante se muestra en la Figura 3.

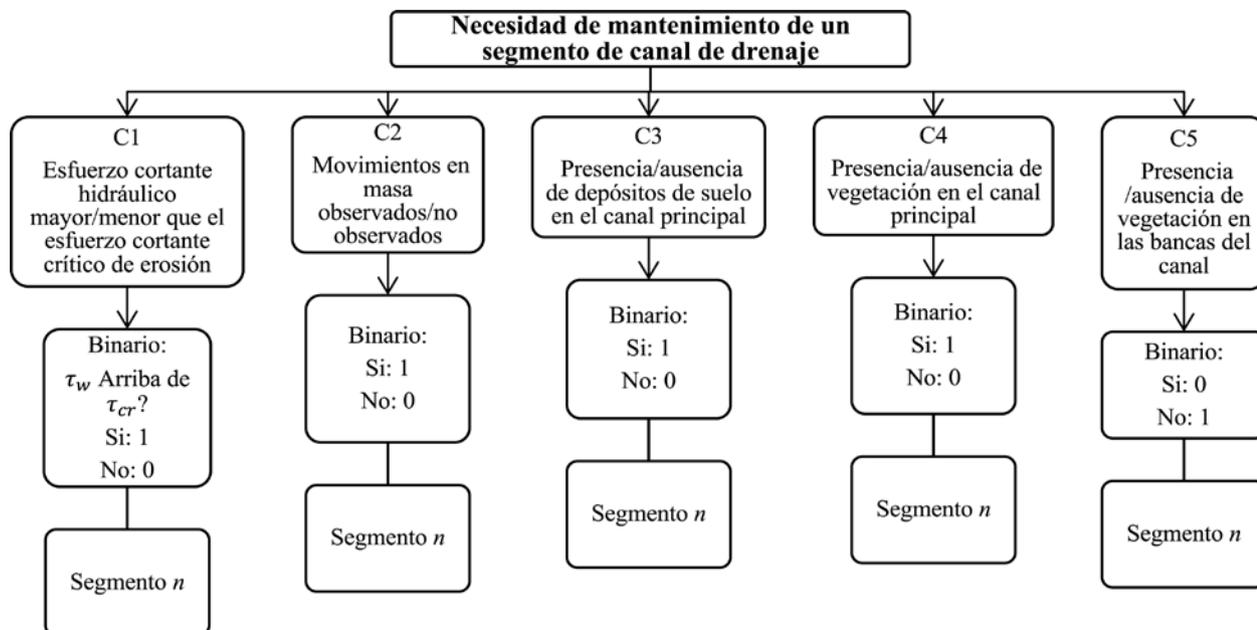


Figura 3. Árbol de decisión jerárquico para priorizar las necesidades de mantenimiento de los segmentos de un canal de drenaje. La escala de puntuación para cada criterio se incluye en el segundo nivel de la jerarquía.

El siguiente paso es establecer las puntuaciones para cada criterio. En el segundo nivel de la Figura 3 se muestra la escala de puntuación para cada criterio. Se eligió una escala binaria simple, donde cada alternativa se evalúa en términos de preguntas del tipo sí/no.

Una vez establecidas las escalas de puntuación establecidas, el siguiente paso consistió en realizar comparaciones directas entre los criterios para obtener sus respectivos pesos. En este proceso se contó con la ayuda de cuatro expertos en el campo pertenecientes a la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Simón (Cochabamba, Bolivia) y a la Universidad de Ciencias Agrícolas (Uppsala, Suecia). Para construir la matriz existen dos posibilidades: i) Cada experto genera una matriz individual para luego, en un paso posterior, consolidar las distintas opiniones en una sola matriz asignando, para este fin, pesos a la opinión de cada experto o tomando promedios a los valores asignados individualmente y ii) cada valor de la matriz es seleccionado considerando la opinión de todos los expertos, de tal manera que se genera una sola matriz. En este trabajo, se siguió el segundo camino y una única matriz fue generada. La matriz de comparación resultante se muestra en la Figura 4.

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	
1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	3	C_1
5	1	1	3	5	C_2
3	1	1	1	3	C_3
2	$\frac{1}{3}$	1	1	3	C_4
$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	C_5

Figura 4. Matriz de comparaciones de a pares.

A partir de la matriz de comparaciones resultante, se obtiene el vector de pesos. Los resultados se muestran en la Tabla 3. Los pesos obtenidos consideran los movimientos de masa observados/no observados como el criterio más importante, por lo tanto, se clasifica en posición 1 de la jerarquía, con un peso final de 0.391 (39.1%). La presencia/ausencia de depósitos de suelo en el canal principal se clasifica en posición 2, con un peso final de 0.256 (25.6%). Es importante recordar que estos pesos reflejan lo que se consideró más importante para este caso de estudio.

Tabla 3
Vector de prioridades y posiciones para cada criterio

Código	Criterio	Peso	Posición
C1:	Esfuerzo cortante hidráulico mayor/menor que el esfuerzo cortante crítico de erosión.	10.5%	4
C2:	Movimientos en masa observados/no observados.	39.1%	1
C3:	Presencia/ausencia de depósitos de suelo en el canal principal.	25.6%	2
C4:	Presencia/ausencia de vegetación en el canal principal.	18.6%	3
C5:	Presencia /ausencia de vegetación en las bancas del canal	6.2%	5

Con los pesos obtenidos, a cada segmento se le asigna una puntuación para cada criterio según la escala de cada criterio. Cada una de estas puntuaciones se multiplica luego por el peso correspondiente a cada criterio para obtener la puntuación final del AHP. Las puntuaciones, finalmente, permiten construir un ranking de los segmentos según su necesidad de

mantenimiento. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Los resultados muestran que el segmento D y E están primero en el orden de prioridad para trabajos de mantenimiento, seguido por el segmento C, B y A. Los resultados son comparables a los obtenidos con MADRAS.

Tabla 4
Las valoraciones dadas a cada segmento para cada criterio, la puntuación AHP final y la prioridad asignada. Prioridad 1 es dada al segmento que está primero en prioridad

Sección	C1	C2	C3	C4	C5	Puntuación AHP	Prioridad
A	1	0	0	0	0	0.105	5
B	0	1	0	0	0	0.391	4
C	0	1	1	0	0	0.647	3
D	1	1	1	1	0	0.938	2
E	1	1	1	1	1	1	1
F	*	*	*	*	*	*	

* El segmento estaba extremadamente degradado y no se pudo realizar la evaluación

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante AHP fueron comparables a los resultados de MADRAS, que es la única metodología aplicada al caso específico de evaluar el estado funcional de canales de drenaje. La ventaja del AHP sobre el MADRAS, es que en el AHP es posible eliminar o añadir criterios al árbol de decisiones según las condiciones de un estudio particular, como se hizo en el presente caso al agregar criterios, no considerados originalmente por MADRAS, como son la susceptibilidad a la erosión del suelo, la distinción entre la vegetación en

el canal principal (impacto negativo) y la vegetación en las bancas del canal (impacto positivo) como dos criterios separados. Además, las escalas utilizadas por AHP para cada criterio, en este caso de estudio todas binarias, pueden ser actualizadas y mejoradas a medida que se disponga de más información. Finalmente, los pesos obtenidos mediante las comparaciones de pares pueden ser actualizados o modificados una vez que se disponga de más conocimiento sobre la contribución de los diferentes criterios a la necesidad de mantenimiento, o cuando otro grupo de expertos esté a cargo de la evaluación.

5. Referencias bibliográficas

- Arshad, Arfan, Zhijie Zhang, Wanchang Zhang, and Adil Dilawar. (2020). "Mapping Favorable Groundwater Potential Recharge Zones Using a GIS-Based Analytical Hierarchical Process and Probability Frequency Ratio Model: A Case Study from an Agro-Urban Region of Pakistan." *Geoscience Frontiers* 11(5):1805–19. doi: 10.1016/j.gsf.2019.12.013.
- Aviles, Daniel, Ingrid Wesström, and Abraham Joel. (2018). "Status Assessment of Agricultural Drainage Ditches." *Transactions of the ASABE* 61(1):263–71. doi: 10.13031/trans.12307.
- Aviles Ribera, Daniel Bernardo Aviles. (2020). "Soil Erosion and Mass Movement in Agricultural Drainage Ditches." PhD Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- Dung, Nguyen Ba, Nguyen Quoc Long, Ropesh Goyal, Dang Tran An, and Dang Tuyet Minh. (2022). "The Role of Factors Affecting Flood Hazard Zoning Using Analytical Hierarchy Process: A Review." *Earth Systems and Environment* 6(3):697–713. doi: 10.1007/s41748-021-00235-4.
- Ghosh, S., Das, D., Gayen, S. K., & Bhardwaj, P. (2023). Delineation of groundwater potential zones using the AHP technique: a case study of Alipurduar district, West Bengal. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-31. doi: 10.1007/s40808-023-01733-2
- Joel, Abraham, Ingrid Wesström, and Ingmar Messing. (2015). "A Tool for Assessing the Status of Drainage Ditches and the Need for Remedial Measures." *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science* 65(sup1):100–109. doi: 10.1080/09064710.2014.996589.
- Kabo-bah, Kamila J., Tang Guoan, Xin Yang, Jiaming Na, and Liyang Xiong. (2021). "Erosion Potential Mapping Using Analytical Hierarchy Process (AHP) and Fractal Dimension." *Heliyon* 7(6):e07125. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07125.
- Kacem, Hicham Ait, Said Fal, Mounir Karim, Hicham Mharzi Alaoui, Hassan Rhinane, and Mehdi Maanan. (2021). "Application of Fuzzy Analytical Hierarchy Process for Assessment of Desertification Sensitive Areas in North West of Morocco." *Geocarto International* 36(5):563–80. doi: 10.1080/10106049.2019.1611949.
- Kumar, Atul, Malay Pramanik, Shairy Chaudhary, and Mahabir Singh Negi. (2021). "Land Evaluation for Sustainable Development of Himalayan Agriculture Using RS-GIS in Conjunction with Analytic Hierarchy Process and Frequency Ratio." *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 20(1):1–17. doi: 10.1016/j.jssas.2020.10.001.
- Magner, J., B. Hansen, C. Anderson, B. Wilson, and J. Nieber. (2010). "Minnesota Agricultural Ditch Reach Assessment for Stability (Madras): A Decision Support Tool." St. Joseph, MI: ASABE.
- Masroor, Md, Sufia Rehman, Haroon Sajjad, Md Hibjur Rahaman, Meheboob Sahana, Raihan Ahmed, and Roshani Singh. (2021). "Assessing the Impact of Drought Conditions on Groundwater Potential in Godavari Middle Sub-Basin, India Using Analytical Hierarchy Process and Random Forest Machine Learning Algorithm." *Groundwater for Sustainable Development* 13:100554. doi: 10.1016/j.gsd.2021.100554.
- Mishra, Arun Pratap, Sachchidanand Singh, Mohit Jani, Kunwar Abhishek Singh, Chaitanya B. Pande, and Abhay M. Varade. (2022). "Assessment of Water Quality Index Using Analytic Hierarchy Process (AHP) and GIS: A Case Study of a Struggling Asan River." *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 1–13. doi: 10.1080/03067319.2022.2032015.
- Needelman, Brian A., Peter J. A. Kleinman, Jeffrey S. Strock, and Arthur L. Allen. (2007). "Drainage Ditches: Improved Management of Agricultural Drainage Ditches for Water Quality Protection: An Overview." *Journal of Soil and Water Conservation* 62(4):171–78.

- Parsian, Saeid, Meisam Amani, Armin Moghimi, Arsalan Ghorbanian, and Sahel Mahdavi. (2021). "Flood Hazard Mapping Using Fuzzy Logic, Analytical Hierarchy Process, and Multi-Source Geospatial Datasets." *Remote Sensing* 13(23):4761. doi: 10.3390/rs13234761.
- Saaty, Thomas L. (2001). "Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process." Pp. 15–35 in *The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making*. Vol. 3, *Managing Forest Ecosystems*, edited by D. L. Schmoldt, J. Kangas, G. A. Mendoza, and M. Pesonen. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Saaty, Thomas L. (2008). "Decision Making with the Analytic Hierarchy Process." *International Journal of Services Sciences* 1(1):83. doi: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
- Setiawan, C., O. S. Hardi, F. R. A'Rachman, O. Ariyanti, R. M. Fattah, M. Baihaqy, and Z. Abidin. (2022). "Determination of Land Conservation Policy Using the Analytical Hierarchy Process Method in Weninggalih Village, Jonggol District, Bogor Regency, West Java." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 986(1):012037. doi: 10.1088/1755-1315/986/1/012037.
- Tolche, Abebe Debele, Megersa Adugna Gurara, Quoc Bao Pham, and Duong Tran Anh. (2022). "Modelling and Accessing Land Degradation Vulnerability Using Remote Sensing Techniques and the Analytical Hierarchy Process Approach." *Geocarto International* 37(24):7122–42. doi: 10.1080/10106049.2021.1959656.
- Topuz, M., & Deniz, M. (2023). Application of GIS and AHP for land use suitability analysis: case of Demirci district (Turkey). *Humanities and Social Sciences Communications*, 10(1), 1-15. doi: 10.1057/s41599-023-01609-x
- Wang, Haidong, Minghui Cheng, Shaohui Zhang, Junliang Fan, Hao Feng, Fucang Zhang, Xiukang Wang, Lijun Sun, and Youzhen Xiang. (2021). "Optimization of Irrigation Amount and Fertilization Rate of Drip-Fertigated Potato Based on Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Comprehensive Evaluation Methods." *Agricultural Water Management* 256:107130. doi: 10.1016/j.agwat.2021.107130.

Estudio del comportamiento físico-reológico de asfalto convencional modificado con diferentes porcentajes de polvo de caucho reciclado

Fernando Melendres¹, Jahel S.Ledezma^{1,*}

¹Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*sarvialedezma@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

La presente investigación evalúa los parámetros reológicos y las características físicas de un cemento asfáltico modificado con diferentes porcentajes en masa de Polvo de Caucho Reciclado (PCR), en comparación con el cemento asfáltico sin modificar y un cemento asfáltico modificado industrialmente con Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) como referencia. Para ello, se llevaron a cabo un total de 150 ensayos de desempeño y 89 ensayos de caracterización física en los materiales, lo que permitió realizar un análisis exhaustivo del comportamiento del material, así como establecer relaciones significativas entre ellos. Los resultados obtenidos revelan que la adición de polvo de caucho reciclado mejora las características de desempeño a temperaturas altas de un cemento asfáltico convencional, sin embargo, se observó que a medida que se incrementa el porcentaje de PCR, la viscosidad aparente aumenta, lo cual puede generar problemas en el bombeo y la mezcla de los materiales. Asimismo, se identificó un valor óptimo de PCR del 9% en masa con respecto al ligante convencional, debido a consideraciones relacionadas con la manejabilidad. Además, se encontró una disminución en el valor-*m* a medida que se incrementa la adición de PCR, lo que podría tener un leve impacto negativo en el desempeño del pavimento a bajas temperaturas.

Finalmente, los resultados indican que la incorporación de polvo de caucho reciclado puede mejorar de manera significativa el desempeño de los cementos asfálticos convencionales, pero es importante tener en cuenta los posibles desafíos asociados con la viscosidad de los materiales al utilizar altos porcentajes de PCR.

Palabras clave: *Reología de cementos asfálticos, Desempeño de cementos asfálticos, Polvo de caucho reciclado.*

Abstract

The present investigation evaluates the rheological parameters and the physical characteristics of an asphalt cement modified with different mass percentages of Recycled Rubber Dust (PCR), in comparison with the unmodified asphalt cement and an asphalt cement industrially modified with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) for reference. For this, a total of 150 performance tests and 89 physical characterization tests were carried out on the materials, which allowed an exhaustive analysis of the behavior of the material, as well as establishing significant relationships between them. The results obtained reveal that the addition of recycled rubber powder improves the performance characteristics at high temperatures of a conventional asphalt cement, however, it was observed that as the PCR percentage increases, the apparent viscosity increases, which can create problems in pumping and mixing materials. Also, an optimal PCR value of 9% by mass with respect to the conventional binder was identified, due to workability considerations. In addition, a decrease in the *m*-value was found as PCR addition increases, which could have a slight negative impact on pavement performance at low temperatures.

Finally, the results indicate that the incorporation of recycled rubber dust can significantly improve the performance of conventional asphalt cements, but it is important to take into account the possible challenges associated with the viscosity of the materials when using high percentages of PCR.

Key words: *Asphalt cement rheology, Asphalt cement performance, Recycled rubber dust.*

1. Introducción

El aumento masivo en la densidad de tráfico en todo el mundo en las últimas décadas ha llevado a un aumento en las fallas prematuras del pavimento. La deformación permanente a temperaturas elevadas, la fractura por fatiga a niveles de temperatura intermedios y la degradación térmica a temperaturas relativamente bajas son los tres tipos más comunes de falla del pavimento. Las fallas tempranas de ahuellamiento en pavimentos son una de las más serias patologías del pavimento, originadas debido a altas temperaturas ambientales y cargas de ejes no controladas; las razones principales de los agrietamientos en el pavimento flexible son el endurecimiento y la fragilidad del cemento asfáltico debido al envejecimiento en la vida útil del pavimento.

Simultáneamente, la abundancia de desechos generados es motivo de preocupación a nivel mundial por el efecto de estos en el cambio climático, generando tendencia hacia el uso de productos 'verdes'. Según WBCSD & The Tire Industry Project (2019) se estima que cada año se producen en todo el mundo mil millones de Neumáticos al Final de su Vida Útil (NFVU).

Según Bahia (1994), la adición de caucho molido resulta generalmente en el incremento del módulo complejo del ligante y en una reducción del ángulo de fase, particularmente a elevadas temperaturas, proporcionando un efecto favorable a la resistencia al ahuellamiento.

Mashaan (2012), estudió los efectos a envejecimiento a corto y largo plazo de ligantes modificados con caucho reciclado. Encontró que el ligante modificado presentaba un decremento en la penetración y un incremento en la viscosidad y el punto de ablandamiento.

En la búsqueda de un mejor desempeño de los recubrimientos asfálticos y métodos para reutilizar estos residuos como material reciclado, los cementos asfálticos modificados con elastómeros son una opción viable. Debido a su contenido de antioxidantes, los neumáticos se pueden utilizar para mejorar la durabilidad del pavimento asfáltico. El método de modificación de un cemento asfáltico se realiza mediante la adición de un modificador de caucho molido denominado Polvo de Caucho Reciclado (PCR). El PCR se utiliza como modificador para

aumentar la elasticidad, flexibilidad y durabilidad del asfalto frente al envejecimiento.

Esta investigación examina los parámetros reológicos de los cementos asfálticos modificados con PCR, como ser el ángulo de fase δ , el módulo de corte complejo ($|G^*|$), el criterio de ahuellamiento ($|G^*|/\sin\delta$), el criterio de fatiga ($|G^*|\sin\delta$), la rigidez a la fluencia por flexión $Sm(t)$ y el valor m .

2. Materiales y métodos

2.1 Composición granulométrica del polvo de caucho reciclado

El polvo de caucho reciclado provino de la planta trituradora de caucho, el tamaño máximo nominal del material corresponde al tamiz N°16.

2.2 Modificación del cemento asfáltico convencional con distintos porcentajes en masa de polvo de caucho reciclado del ligante asfáltico

La incorporación del caucho reciclado se desarrolló por vía húmeda. La modificación se realizó en un homogeneizador de ligante bajo condiciones controladas. La adición del PCR se realizó como un porcentaje en masa de este ligante. De acuerdo con los antecedentes internacionales, se comienza con la adición de un valor máximo del 21% de PCR y con el fin de realizar un estudio completo de la incidencia del PCR en el comportamiento reológico se decrece este porcentaje hasta que el material resultante presente valores típicos de viscosidad. De esta forma, los porcentajes de adición de PCR empleados fueron del 9%, 12%, 15%, 18% y 21%. La homogeneización de los materiales se realizó a 180 °C, a 1700 rpm durante 1 h.

2.3 Caracterización física de los cementos asfálticos

Se llevó a cabo la caracterización física de los cementos asfálticos modificados con polvo de caucho (CAM PCR) en comparación con el ligante sin modificar (CA) y un ligante asfáltico modificado con estireno-butadieno-estireno (CAM SBS). Estos dos últimos ligantes se utilizaron como referencia para el estudio de las propiedades reológicas de los materiales. Los ensayos realizados para determinar las características físicas de los cementos asfálticos utilizados se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1
Caracterización física de los cementos asfálticos

Ensayo	Estándar	CA 60/70	CAM 9% PCR	CAM 12% PCR	CAM 15% PCR	CAM 18% PCR	CAM 21% PCR	CAM SBS
Penetración	ASTM D5 (2020)	1	1	1	1	1	1	1
Viscosidad	ASTM D4402 (2015)	1	3	3	3	3	3	1
Punto de ablandamiento	ASTM D36 (2014)	1	3	3	3	3	3	1
Punto de inflamación	ASTM D92 (2018)	1	3	3	3	3	3	1
Gravedad específica	ASTM D70 (2021)	1	3	3	3	3	3	1
Ductilidad	ASTM D113 (2017)	1	1	1	1	1	1	1
Recuperación elástica	ASTM D6084 (2018)	1	1	1	1	1	1	1
Número de resultados de ensayos		7	15	15	15	15	15	7
Total		89						

Fuente: Autores

2.4 Caracterización reológica de los cementos asfálticos

Se llevaron a cabo pruebas para determinar las propiedades reológicas de los materiales en su estado original, así como en su estado envejecido a corto y largo plazo de los cementos asfálticos investigados. Los ensayos utilizados para determinar las características reológicas de los cementos asfálticos se describen en la Tabla 2.

2.5 Evaluación de los cementos asfálticos estudiados

Se realizaron un total de 150 ensayos de desempeño y 89 ensayos de caracterización física en los materiales. A pesar de que el procedimiento fue diverso, extenso y repetitivo, los resultados obtenidos permitieron

realizar un análisis detallado del comportamiento de cada material, así como establecer relaciones existentes entre ellos. Los resultados procesados y los análisis comparativos en forma gráfica se presentan en la siguiente sección.

3. Resultados

3.1 Modificación del cemento asfáltico convencional con distintos porcentajes en masa de polvo de caucho reciclado del ligante asfáltico

La adición del PCR se realizó como un porcentaje en masa del Cemento Asfáltico (CA), a través del proceso de incorporación por vía húmeda. A continuación, la Tabla 2 detalla las cantidades utilizadas en la producción de Cemento Asfáltico Modificado (CAM).

Tabla 2
Modificación del cemento asfáltico convencional con distintos porcentajes en masa de polvo de caucho reciclado del ligante asfáltico

Identificación	CAC 60/70, g	PCR, g	Descripción
CAM 9% de PCR	2388,0	214,9	CA 60/70 + 9% de PCR
CAM 12% de PCR	2385,0	286,2	CA 60/70 + 12% de PCR
CAM 15% de PCR	2390,0	358,5	CA 60/70 + 15% de PCR
CAM 18% de PCR	2380,0	428,4	CA 60/70 + 18% de PCR
CAM 21% de PCR	2384,0	500,6	CA 60/70 21% de PCR

Fuente: Autores

3.2 Caracterización física de los cementos asfálticos

Los valores registrados en este apartado son el resultado de la media aritmética de los ensayos realizados para cada muestra de material. Los ensayos de laboratorio se realizaron sobre los materiales en estado original.

De acuerdo con la Figura 1 se evidencia un incremento en la consistencia del ligante asfáltico convencional con la adición de PCR, el cemento asfáltico modificado con SBS presenta un valor similar al del ligante asfáltico convencional, mas no está relacionado directamente con este.

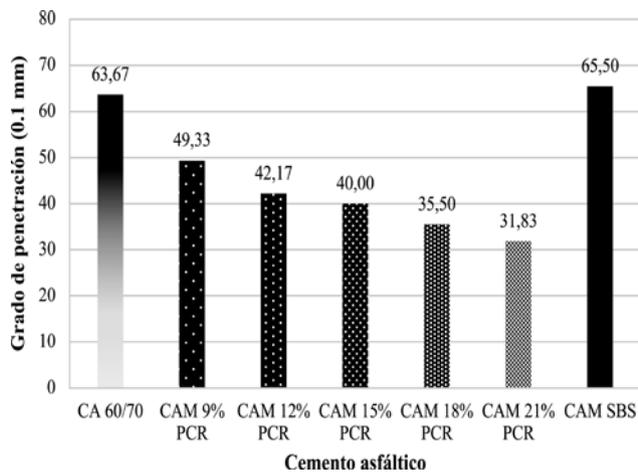


Figura 1. Resultados de las pruebas estándar de penetración en los cementos asfálticos.

La Figura 2 muestra un incremento en la viscosidad del ligante asfáltico convencional de acuerdo con el incremento de PCR, el cemento asfáltico modificado con SBS presenta un valor cercano al cemento asfáltico modificado con 9% de PCR. De acuerdo con

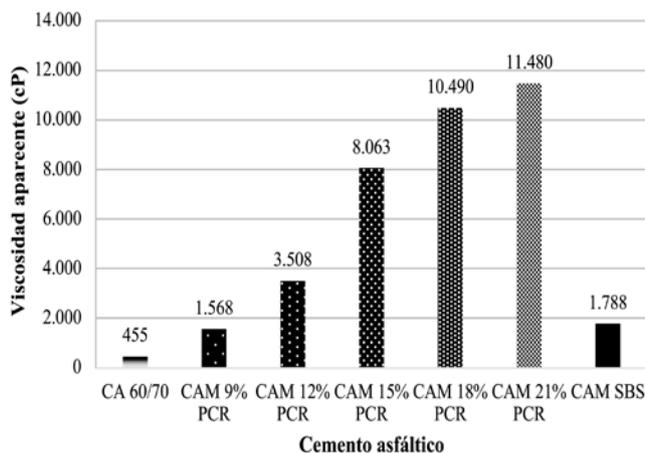


Figura 2. Resultados de las pruebas estándar de viscosidad en un viscosímetro rotacional de los cementos asfálticos.

los criterios de temperaturas de bombeo y mezclado establecidos en la clasificación por desempeño de ligantes asfálticos ASTM D6373-21^a, se recomienda que la viscosidad máxima sea 3000 cP, motivo por el cual ligantes modificados con PCR a partir del 12% en masa no serían recomendados.

La Figura 3 muestra un incremento en el punto de ablandamiento del ligante convencional de acuerdo con la adición de PCR que se realiza.

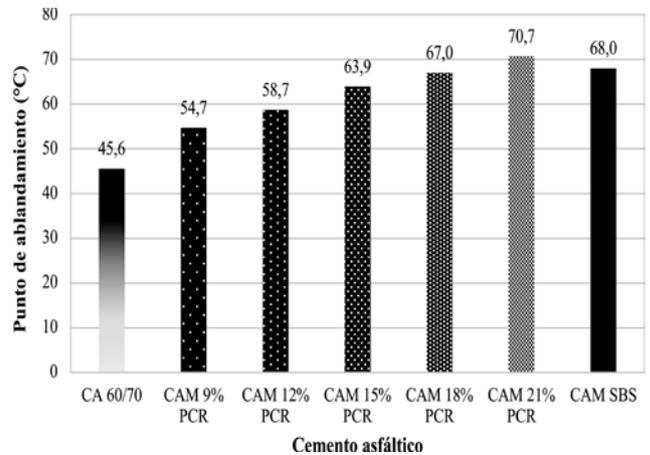


Figura 3. Resultados de las pruebas estándar del punto de ablandamiento de los cementos asfálticos.

La Figura 4 presenta los puntos de inflamación de los ligantes respectivamente, a pesar de que se presentan diferencias en los resultados del material, no se evidencia una tendencia clara en los cementos asfálticos modificados con PCR. Todos los materiales cumplen con el criterio de seguridad mencionado en la clasificación por desempeño de ligantes asfálticos ASTM D6373-21^a donde se establece un valor mínimo de punto de inflamación de 230°C.

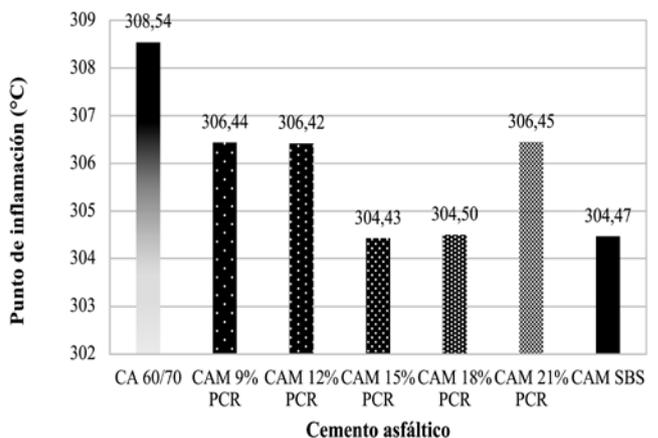


Figura 4. Resultados de las pruebas estándar del punto de inflamación de los cementos asfálticos.

La Figura 5 muestra la gravedad específica registrada para cada material estudiado, este valor se ve incrementado con la presencia de PCR en el cemento asfáltico convencional. El cemento asfáltico modificado con SBS presenta la densidad más baja de las muestras.

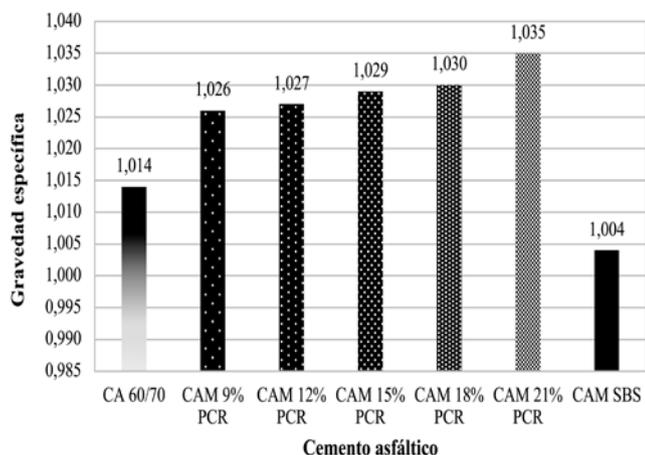


Figura 5. Resultados de las pruebas estándar de gravedad específica por el método del picnómetro de los cementos asfálticos.

La Figura 6 muestra el decremento de la ductilidad del asfalto convencional modificado con PCR según la adición de este. La ductilidad se ve reducida en un valor cercano al 90% con la adición del primer porcentaje de PCR, y mantiene una tendencia de disminución.

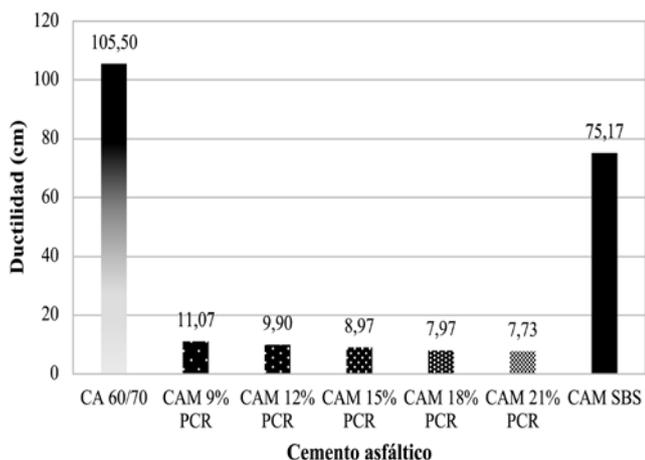


Figura 6. Resultados de las pruebas estándar de ductilidad de los cementos asfálticos.

La Figura 7 evidencia incrementos notables en las características elásticas del cemento asfáltico convencional debido a la adición de PCR.

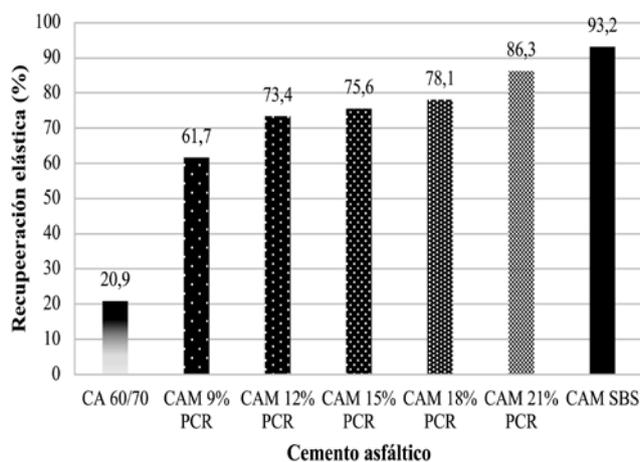


Figura 7. Resultados de las pruebas estándar de recuperación elástica de los cementos asfálticos.

3.3 Caracterización reológica de los cementos asfálticos

La caracterización reológica de los cementos asfálticos en estudio fue desarrollada en estado original, envejecido a corto y largo plazo.

3.4 Propiedades reológicas del material en estado original

La Figura 8 muestra el incremento del módulo complejo de corte con la adición de PCR.

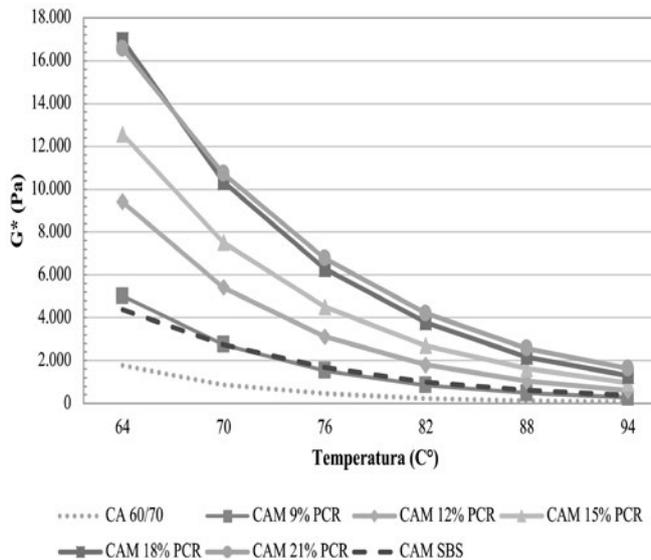


Figura 8. Módulo complejo de corte de los cementos asfálticos estudiados en estado original

Conforme se observa en la Figura 9, se evidencia un incremento en la resistencia a la sensibilidad del ligante ($|G^*|/\sin\delta > 1000$ Pa, obtenida en el reómetro

de corte dinámico, este valor incrementa notablemente a temperaturas elevadas, lo que favorece a la construcción.

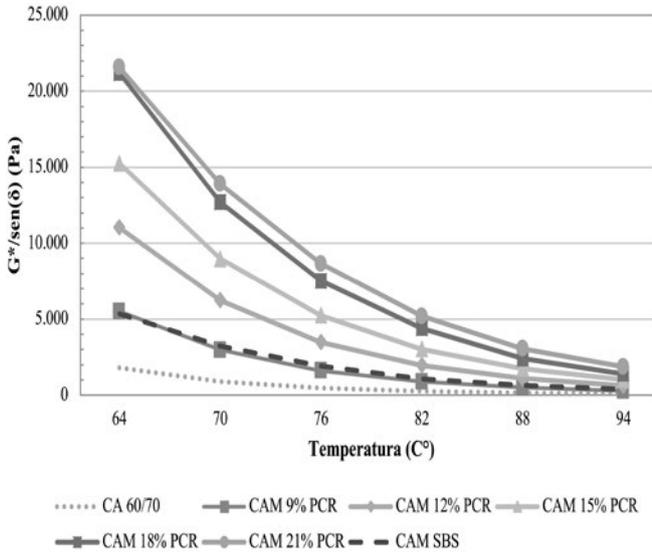


Figura 9. Criterio de sensibilidad de los cementos asfálticos estudiados.

3.5 Propiedades reológicas del material envejecido a corto plazo

La Figura 10 muestra el incremento del módulo complejo de corte con la adición de PCR.

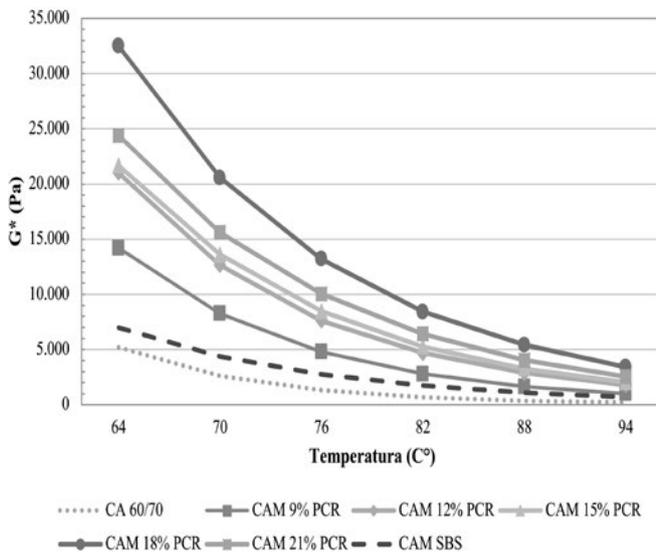


Figura 10. Módulo complejo de corte de los cementos asfálticos estudiados en estado envejecido a corto plazo.

La Figura 11 evidencia un incremento del criterio de rigidez frente al ahuellamiento ($|G^*|/\sin\delta > 2200$ Pa, obtenida en el reómetro de corte dinámico, este valor

incrementa notablemente a temperaturas elevadas, lo que favorece el desempeño.

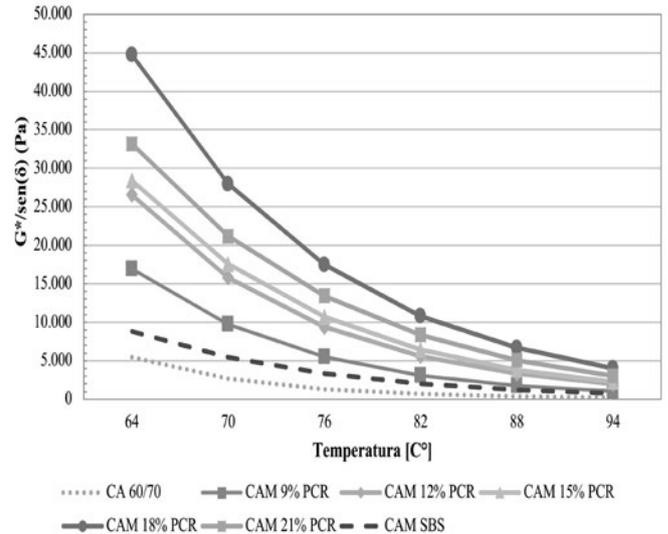


Figura 11. Criterio de resistencia al ahuellamiento de los cementos asfálticos estudiados.

3.6 Propiedades reológicas del material envejecido a largo plazo

La figura 12 muestra un decremento del módulo complejo de corte con la adición de PCR. Sin embargo, no se aprecia una tendencia clara, esto se debe aparentemente por la incidencia de las partículas presentes en la muestra, al ser la muestra en tamaño similar a una gota, una ligera variación en las partículas de PCR puede ocasionar una dispersión notable.

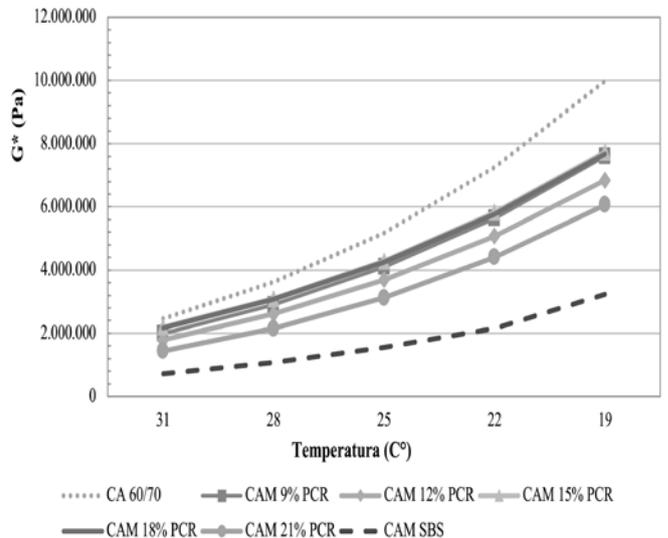


Figura 12. Módulo complejo de corte de los cementos asfálticos estudiados en estado envejecido a largo plazo.

La Figura 13 evidencia una mejora en el criterio de resistencia a la fatiga ($|G^*| \sin \delta$) < 5000000 Pa debido a la adición de PCR. Sin embargo, no se presenta una tendencia clara de mejora entre los distintos porcentajes de PCR debido al tamaño pequeño de las muestras y la dispersión de las mismas partículas de PCR en estas.

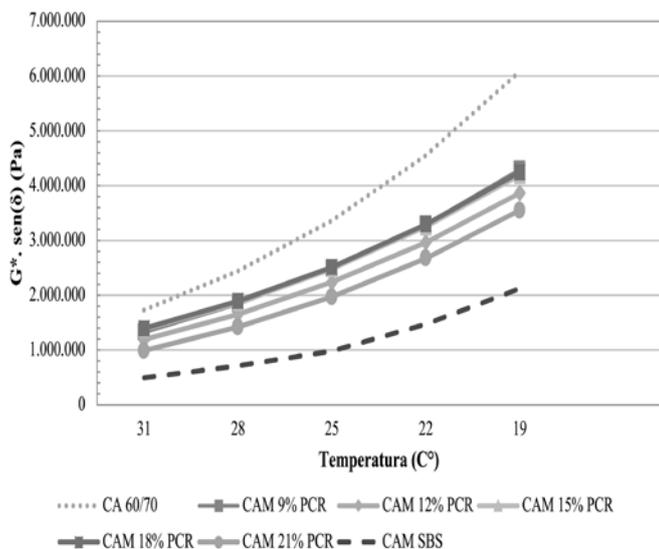


Figura 13. Criterio de resistencia a la fatiga de los cementos asfálticos estudiados.

La Figura 14 muestra que a medida que se adiciona PCR al ligante convencional, este presenta una ligera disminución de la rigidez a la fluencia del ligante, hecho que se repite a las diferentes temperaturas evaluadas de -6, -12 y -18 °C, respectivamente.

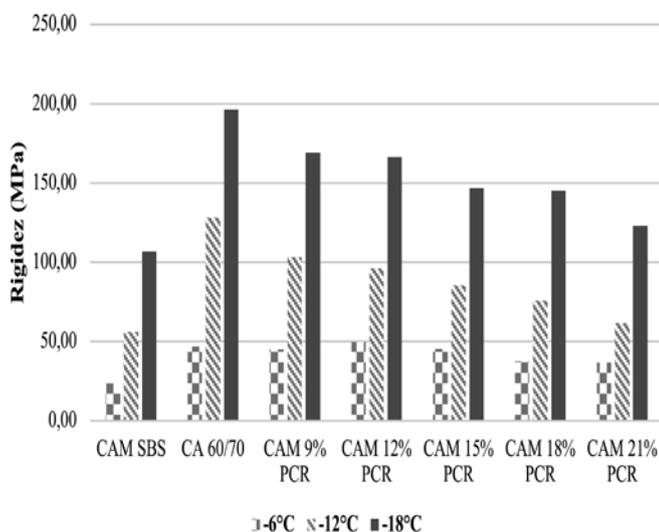


Figura 14. Rigidez a la fluencia de los cementos asfálticos estudiados a distintas temperaturas.

La Figura 15 señala un decremento en el valor-m a medida que se incrementa la adición de PCR para una temperatura de -6, -12 y -18 °C, respectivamente. El valor-m indica la resistencia al flujo de la muestra de asfalto a bajas temperaturas. Un valor-m más bajo indica una mayor susceptibilidad al flujo.

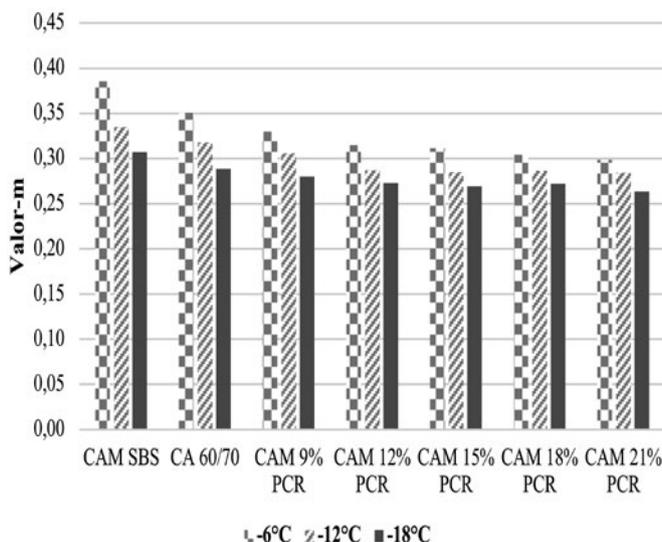


Figura 15. Valor-m de los cementos asfálticos estudiados a distintas temperaturas.

4. Conclusiones

La adición de PCR mejora significativamente las características de desempeño a altas temperaturas de un cemento asfáltico convencional.

Aunque no se presenta una tendencia clara en la mejora de los ligantes asfálticos modificados con PCR respecto al criterio de fatiga, todos los resultados muestran una mejora en comparación con el ligante convencional, lo cual contribuiría al desempeño del pavimento asfáltico.

A medida que se aumenta el porcentaje de PCR, se incrementa la viscosidad aparente, lo cual puede ocasionar problemas en el bombeo y en la mezcla de los materiales. En este estudio, se determinó que el valor óptimo de PCR, teniendo en cuenta el bombeo y la manejabilidad, es del 9% en masa con respecto al ligante convencional.

Además, se observa una disminución en el valor-m a medida que se aumenta la adición de PCR, lo cual puede resultar en una ligera reducción en el rendimiento del pavimento a bajas temperaturas.

5. Recomendaciones

Se recomienda continuar la investigación en el desempeño de mezclas asfálticas preparadas a partir de cementos asfálticos modificados con PCR.

Agradecimientos

Agradecimiento especial al Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos y a la fundación SWISSCONTACT por brindar los medios necesarios por los cuales fue posible ejecutar esta investigación.

6. Referencias bibliográficas

- ASTM D113. (2017). *Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials*. American Society for Testing and Materials. USA
- ASTM D36. (2014). *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. American Society for Testing and Materials. USA.
- ASTM D4402. (2015). *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. American Society for Testing and Materials. USA.
- ASTM D5. (2020). *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. American Society for Testing and Materials. USA.
- ASTM D6084. (2018). *Standard Test Method for Elastic Recovery of Asphalt Materials by Durometer*. American Society for Testing and Materials. USA.
- ASTM D6373. (2021). *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D70. (2021). *Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Asphalt Binder (Pycnometer Method)*. American Society for Testing and Materials. USA.
- ASTM D92. (2018). *Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*. American Society for Testing and Materials. USA.
- Bahia. H. (1994). *Effect of crumb rubber modifiers (CRM) on performance related properties of asphalt binders*. Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT). USA
- Mashaan, N., Rehan K., Abdelaziz, M. (2012). *An overview of crumb rubber modified asphalt*. International Journal of the Physical Sciences Vol. 7(2), pp. 166 – 170.
- WBCSD, T. (2019). *Global ELT Management-A global state of knowledge on regulation, management systems, impacts of recovery and technologies*. World Business Council For Sustainable Development.

Formulación de mortero autonivelante usando cenizas de cascarilla de arroz como agregado inorgánico y anhidrita, mediante el diseño de mezclas

Juan Alcón¹, Wilson Aguilar¹, Miguel Gonzales, Christian Nina

¹Departamento de Química, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón

*j.alcon@umss.edu.bo

Resumen

Un mortero autonivelante es un mortero de consistencia muy fluida que sin ayuda puede nivelarse por sí mismo y presenta suficiente cohesión. Este proyecto tiene como objetivo el aprovechamiento de la ceniza de cascarilla de arroz como agregado inorgánico para la formulación de un mortero autonivelante en concreto de soleras, por lo cual se elaboraron morteros de diferentes dosificaciones de ceniza de cascarilla de arroz, anhidrita, cemento, y arena. La ceniza de cascarilla de arroz se obtuvo al incinerar por 3 h y 30 min a 750 °C, se obtuvo un contenido de sílice de 91.81 % en peso.

Aplicando un diseño de mezclas y con la ayuda del programa SAS. 9.4 se obtuvo una formulación óptima de cemento 35.48 %, ceniza-anhidrita (50/50) 36.76 %, arena 27.76 %, el cual obtuvo una resistencia a la compresión de 25.41 MPa y una resistencia a la flexión de 6.55 MPa a los 28 días.

Palabras clave: *Mortero, Anhidrita, Compresión, Flexión.*

Abstract

A self-leveling mortar is a mortar with a very fluid consistency that can level itself without assistance and has sufficient cohesion. This project aims to use rice husk ash as an inorganic aggregate for the formulation of a self-leveling mortar in screed concrete, for which mortars with different dosages of rice husk ash, anhydrite, cement, and sand. The rice husk ash was obtained by incinerating for 3 h and 30 min at 750 °C, a silica content of 91.81% by weight was obtained.

Applying a mixture design and with the help of the SAS program. 9.4 an optimal formulation of cement 35.48%, ash-anhydrite (50/50) 36.76%, sand 27.76% was obtained a compressive strength of 25.41 MPa and a flexural strength of 6.55 MPa at 28 days.

Key words: *Mortar, Anhydrite, Compression, Bending.*

1. Introducción

En la actualidad las investigaciones a los nuevos materiales de ingeniería y la utilización de los residuos agroindustriales generados tienen un importante papel para el desarrollo ambiental, al generar innovación y mejora que fortalecen la producción de productos de construcción y la prestación de servicios amigables para el medio ambiente (Vásquez, 2000).

La obtención de cemento para fabricar concreto implica un alto consumo energético y grandes emisiones de gases, lo que lo convierte en un material costoso y contaminante. La industria del cemento a escala mundial tiene el 2 % de consumo global de energía y el 5 % del consumo global de energía industrial, lo

que genera aproximadamente una tonelada de CO₂ por cada tonelada de Clinker dependiendo de la eficiencia de la planta. En algunos casos se podría sustituir el cemento por residuos agroindustriales (cascarilla de arroz), obteniendo muy buenos resultados (Méndez, 2010).

El empleo de estas adiciones agroindustriales como sustituto de cierto porcentaje de cemento disminuye de forma significativa el costo medioambiental de la construcción, al reducir parte de la generación de CO₂ y explotación minera necesarias para la producción de cemento, además de mejorar la gestión de los residuos reutilizados y evitar su disposición en botaderos (Martirena, 2004).

La Universidad Nacional de Ingeniería del Perú (UNI) proyecta masificar el uso de cascarilla de arroz incinerada y molida como un importante componente para fabricar materiales de construcción que permitan edificar en el futuro viviendas seguras y de bajo costo en diversas zonas del país. Han logrado establecer contactos con el Ministerio de Vivienda para brindarle la asesoría técnica del caso en la construcción de viviendas rurales, en las cuales podría incorporarse este insumo, disminuyendo así su costo. Se explicó que la cascarilla de arroz es un desecho agroindustrial que se puede aprovechar para sustituir una parte del cemento y reducir el gasto de producción de ladrillos, tejados, techos prefabricados, adoquines de suelo, morteros entre otros (Padilla, 2010).

La obtención del cemento para fabricar concreto implica un alto consumo energético y grandes emisiones de CO₂ lo cual se convierte en un material costoso y contaminante, pero brinda un amplio desarrollo a un nivel ambiental social y económico en algunos casos se podría sustituir el cemento con adiciones de residuos agroindustriales (Vásquez, 2000). La industria del cemento a escala mundial tiene el 2% del consumo global de energía y el 5 % del consumo global de energía industrial lo que genera aproximadamente una tonelada de CO₂ por cada tonelada de Clinker dependiendo de la eficiencia de la planta (Vanderley, 2002).

En algunos casos se podría sustituir al cemento por adiciones de residuos agropecuarios (cascarilla de arroz), obteniendo muy buenos resultados (Méndez, 2010; Paya, 2003). El empleo de estas adiciones de residuos agropecuarios como sustituto de cierto porcentaje de cemento disminuye de forma significativa el costo medioambiental de la construcción al reducir parte de la generación de CO₂ y explotación minera necesarias para la producción de cemento además de reutilizar los residuos y evitar su disposición en relleno sanitario (Martinela, 2004).

Se necesitará de una óptima dosificación que permitirá introducir la cantidad exacta de ceniza de cascarilla de arroz, cemento, arena y anhidrita para posteriormente ser mezclado con agua y aditivos. Esta dosificación debe cumplir con parámetros que garantice este producto mediante el uso de normativas ASTM C-109, C-125, C-191, C-230, C-293 y C-642.

2. Materiales y métodos

Las materias primas para la elaboración de los morteros autonivelantes son: cemento IP 30 (Coboce),

arena lavada procedente de la región de Parotani la cual se lleva a secar en un horno a 100 - 110 °C por 24 h, la ceniza de cascarilla de arroz procedente de la peladora de arroz "SACABA" ubicada en el municipio de Sacaba km 10 de la Avenida Villazón. La ceniza se calcina por 3 h y 30 min a 750 °C en un horno mufla y piedra de ajlez de la yasería de la localidad de Viloma esta se calcinó por 2 h a 850 °C y obtención de la anhidrita.

Antes del proceso de amasado, se obtienen las humedades de la arena y posteriormente se tamizan para garantizar de esta manera que no hubiera áridos de tamaño superior a 4 mm y seguidamente se pesan todos los materiales: cemento, anhidrita, arena y ceniza de cascarilla de arroz.

Inicialmente el amasado se realizó según el procedimiento que se especifica para morteros en la norma ASTM C-109.

Se siguió el siguiente procedimiento para el mezclado del mortero:

- Se procede a hacer el registro de los pesos del cemento, arena, anhidrita y ceniza de cascarilla de arroz.
- Se introduce la totalidad del cemento, arena, anhidrita y ceniza de cascarilla de arroz en el recipiente de la amasadora y se mezclan durante 30 s a velocidad lenta.
- Se continúa la mezcla donde se añade agua y un aditivo (SIKA® VISCOCRETE 5000) durante 30 s.
- Amasado durante 2 min a velocidad lenta.
- Finalmente se añade a los moldes de compresión y flexión.

Los moldes tanto para la compresión y flexión deben estar limpios y listos para su uso. Se debe añadir un aislante plástico para el fácil desmoldado de las caras internas de los moldes, y se debe evitar que se produzcan defectos.

Para el respectivo llenado se extiende una capa uniforme y al final del proceso se retira el exceso de mezcla con una espátula, con movimientos transversales y finalmente el exceso de mezcla se retira alrededor del perímetro del molde.

2.1. Análisis químico de la ceniza de cascarilla de arroz

El análisis químico se realizó en los ambientes de Laboratorio de Servicios de la Carrera de Ingeniería Química y se determinó que la ceniza de cascarilla de arroz utilizada es apta para la elaboración de morteros.

Estos morteros tienen un porcentaje elevado de óxido de silicio. Para contrastar este resultado también se llevó a cabo el análisis de la muestra en el Departamento de Física con un microscopio SEM (Scanning Electron Microscope) que utiliza electrones para observar muestras.

Los electrones se enfocan en la superficie de la muestra y se escanean. El microscopio está equipado con detectores que recopilan la información de los electrones reflejados, creando una imagen tridimensional de alta resolución de la misma.

Para preparar el análisis de la muestra de ceniza de cascarilla de arroz para el SEM se dispersó la muestra en cinta de carbono conductor.

2.2. Determinación de la resistencia a la compresión

Sirve para evaluar el comportamiento de las probetas frente a esfuerzos mecánicos. Se determinó los ensayos de compresión siguiendo las recomendaciones especificadas en la norma ASTM C -109 para probetas enmoldadas de mortero. En este ensayo consiste en determinar la resistencia a la compresión de los morteros a los 28 días, mientras más edad, mayor resistencia. La norma nos indica realizar las probetas en moldes cúbicos de 5cm* 5cm* 5cm. Una vez elaborado los morteros para compresión se procedió a medir su resistencia con el equipo de compresión, la carga se aplica sin aceleraciones y se aumenta progresivamente a un ritmo comprendido entre 50 N/s y 500 N/s de tal modo que la rotura sea entre 30 s y 90 s. La carga máxima aplicada, en N, durante el ensayo se registra, así como la edad de las probetas y la edad en el momento de desmoldarlas.

2.3. Determinación de la resistencia a la flexión

En este ensayo se determina cuan flexible es un mortero por edad a los 7, 14 y 28 días, mientras más edad mayor resistencia a la flexión tendrá el mortero. El procedimiento que se siguió es al establecido por la norma ASTM C -109.

Para los ensayos de prueba a la flexión la norma indica realizar las probetas en moldes de 16 cm de largo, 4 cm de ancho y 4 cm de alto.

3. Resultados

3.1. Composición química de la ceniza de cascarilla de arroz

Los resultados del análisis químico obtenido en el laboratorio de servicios del Departamento de Química se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1
Composición de la ceniza de cascarilla de arroz en % en peso

Parámetros	Método	Resultado
Sílice (SiO ₂)	Gravimétrico	91.81 %
Oxido de calcio (CaO)	Complexométrico	1.49 %
Sulfatos (SO ₄) ²⁻	Espectrofotométrico	5.96 %

En la cual se observa el contenido de óxido de silicio del 91.81 %, una concentración muy elevada y apta para la elaboración de morteros y un 5.96 % en sulfatos. La cual se encuentra en el rango reportado por Castro (2021),

Los resultados obtenidos del Microscopio electrónico de barrido del Departamento de Física se muestran en la Figura 1 y 2

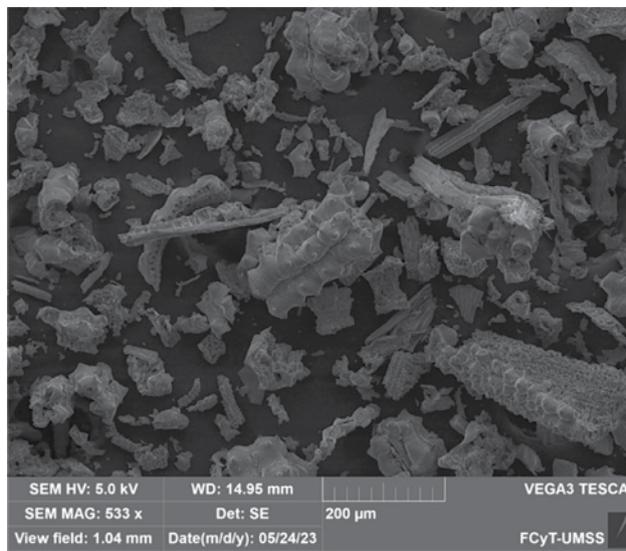


Figura 1. Imagen obtenida del microscópico electrónico de barrido de la muestra de ceniza de la cascarilla de arroz.

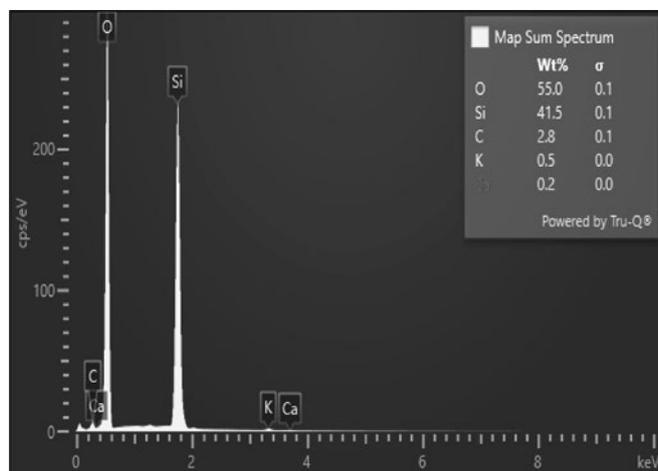


Figura 2. Análisis elemental de la muestra de ceniza de la cascarilla de arroz.

En la Figura 1 se observa el tamaño de la ceniza de cascarilla de arroz a una escala de 200 μm . En la Figura 2 se observa el contenido de silicio del 41.50 % que convertido a oxido de silicio es de 88.93 %. El cual es muy próximo al hallado en el análisis químico y se puede ver que es similar al encontrado en la investigación de Castro (2021), autor que indica la amorficidad de la ceniza de cascarilla de arroz a temperaturas de 600 a 800 $^{\circ}\text{C}$ en mufia. El cual confirma que la ceniza de cascarilla de arroz si es aplicable en la elaboración de morteros.

3.2. Efecto de la mezcla sobre la resistencia a la compresión aplicando el programa SAS

Los resultados de la resistencia a la compresión y la

Tabla 3

ANOVA para la variable de respuesta resistencia a la compresión (MPa)

Source	Master Model					Predictive Model				
	DF	SS	MS	F	Pr > F	DF	SS	MS	F	Pr > F
Cemento	1	119.1954	119.1954	65.954	<.0001	1	114.7702	114.7702	49.93751	<.0001
Cen-anhi	1	57.02067	57.02067	31.55105	0.0002	1	61.30365	61.30365	26.67376	0.0003
Arena	1	23.21036	23.21036	12.84291	0.0050	1	37.10881	37.10881	16.14637	0.0020
Cemento*Cen-Anhi	1	115.024	115.024	63.64585	<.0001	1	108.4373	108.4373	47.18204	<.0001
Cemento*Arena	1	73.30727	73.30727	40.56286	<.0001	1	87.12	87.12	37.90668	<.0001
Cen-Anhi*Arena	1	7.208524	7.208524	3.988668	0.0737					
Model	5	153.6919	30.73837	17.00836	0.0001	4	146.4833	36.62084	15.93405	0.0002
Error	10	18.07251	1.807251			11	25.28103	2.298276		
(Lack of fit)	2	8.175842	4.087921	3.304483	0.0899	3	15.38437	5.128122	4.145333	0.0478
(Pure Error)	8	9.896667	1.237083			8	9.896667	1.237083		
Total	15	171.7644				15	171.7644			

matriz de datos de los componentes de la mezcla se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2

Matriz de datos de la resistencia a la compresión (MPa)

	Cemento	Cen-Anh	Arena	Compresión
1	0.34	0.37	0.29	18.6
2	0.34	0.37	0.29	18.1
3	0.34	0.38	0.28	21.6
4	0.34	0.38	0.28	21.8
5	0.34	0.39	0.27	18.9
6	0.34	0.39	0.27	18.0
7	0.34	0.39	0.27	18.5
8	0.35	0.36	0.29	24.5
9	0.35	0.36	0.29	28.7
10	0.35	0.37	0.28	26.1
11	0.35	0.38	0.27	26.3
12	0.35	0.38	0.27	26.2
13	0.36	0.36	0.28	21.3
14	0.36	0.36	0.28	21.5
15	0.36	0.37	0.27	20.6
16	0.36	0.37	0.27	21.6

El valor máximo obtenido es de 28.7 MPa. y el valor mínimo es de 18 MPa. El valor máximo en este proyecto es superior a los obtenidos en otros trabajos sobre morteros autonivelantes, donde se llegó a obtener solamente 20,42 MPa (Flores, 2015).

Los resultados del análisis de varianza entregado por el SAS para la variable de respuesta resistencia a la compresión (MPa) se muestran en la Tabla 3.

En la Tabla 3 se puede observar que los efectos significativos son los efectos principales, cemento, cen-anhi y arena, además de las interacciones cemento*cen-anhi. y cemento*arena. Pero son las interacciones indicadas las que contribuyen a los valores de la resistencia a la compresión.

El estadístico Lack of fit (falta de ajuste), por su probabilidad (Pvalue=0.0899) que es mayor a 0.05, indica que el modelo ajusta bien los datos de la variable de respuesta Resistencia a la compresión (MPa).

El modelo estadístico para la Resistencia a la compresión (MPa) se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4

Modelo predictivo codificado para Resistencia a la compresión (MPa)

Coded Levels (-1,1)	
Compresión	= 25309.8*cemento - 7276.465*cen-anhi - 7491.531*arena + 59820*cemento*cen-anhi + 60490*cemento*arena

La importancia de los factores cemento y las interacciones cemento*cen-anhi y cemento*arena, se pueden observar en el modelo de la Tabla 4. Debido a que las pendientes de las interacciones en el modelo son positivas, esto quiere decir que contribuyen positivamente a la resistencia a la compresión.

En la Tabla 5, se muestra el coeficiente de determinación del modelo planteado.

Tabla 5

Cuadro de ajuste del modelo para la Compresión

	Master Model	Predictive Model
RMSE	1.34434	1.516006
R-square	89.48%	85.28%
Adjusted R-square	84.22%	79.93%
Coefficient of Variation	6.105434	6.885071

El valor del coeficiente de determinación significa que el porcentaje de varianza explicada por el modelo es del 89.48 % y a su vez indica que la mayor parte de la variabilidad constatado en la compresión está asociada a las variables explicativas incluidas en el modelo.

Tabla 6

Establecimiento del perfil predictivo para resistencia a la compresión (MPa)

Factor	Label	Optimal Setting	Response	Estimated Value
Cemento	CEM	0.3548	Compresión	25.40867 [24.1017,26.71564]
Cen-Anhi	CENANHI	0.3676	Desirability	75.78%
Arena	ARENA	0.2776		

La Tabla 6 entrega el perfil predictivo para la variable de respuesta resistencia a la compresión (MPa). Esta indica que para obtener un valor de resistencia a la compresión de 25.41 MPa, los componentes de la mezcla son: 35.48 % de cemento, 36.76 % de cen-anhi y 27.76 % de arena.

3.3. Efecto de la mezcla sobre la resistencia a la flexión aplicando el programa SAS

Los resultados de la resistencia a la flexión y la matriz de datos de los componentes de la mezcla se pueden observar en la Tabla 7.

Tabla 7
Matriz de datos resistencia a la flexión de los componentes de la mezcla

	Cemento	Cen-Anh	Arena	Flexion
1	0.34	0.37	0.29	5.0
2	0.34	0.37	0.29	4.3
3	0.34	0.38	0.28	5.7
4	0.34	0.38	0.28	5.9
5	0.34	0.39	0.27	5.8
6	0.34	0.39	0.27	6.2
7	0.34	0.39	0.27	6.1
8	0.35	0.36	0.29	5.8
9	0.35	0.36	0.29	6.8
10	0.35	0.37	0.28	6.3
11	0.35	0.38	0.27	6.7
12	0.35	0.38	0.27	6.6
13	0.36	0.36	0.28	6.5
14	0.36	0.36	0.28	6.4
15	0.36	0.37	0.27	6.2
16	0.36	0.37	0.27	6.1

Al procesarlo según el programa del SAS, se puede determinar el cuadro de análisis de varianza para determinar cuáles de los componentes de la mezcla son significativos.

Son significativas las interacciones cemento*cen-anhi (Pvalue=0.0233) y cemento*arena (Pvalue=0.0032) que están incluidas en el modelo y su coeficiente positivo indica que la resistencia a la flexión es debido a estas dos interacciones.

En la Tabla 8 se muestra el cuadro de ANOVA para la variable de respuesta resistencia a la flexión (MPa).

Tabla 8
Cuadro ANOVA para la variable de respuesta resistencia a la flexión

Source	DF	Master Model				Pr > F	DF	Predictive Model			
		SS	MS	F	Pr > F			SS	MS	F	Pr > F
Cemento	1	1.50872	1.50872	13.76668	0.0040	1	1.45158 9	1.451589	13.44252	0.003 7	
Cen-Anhi	1	0.08722 3	0.087223	0.795889	0.3933	1	0.01458 4	0.014584	0.13506	0.720 2	
Arena	1	0.72324	0.72324	6.599382	0.0279	1	2.20842 3	2.208423	20.45123	0.000 9	
Cemento*Cen-Anhi	1	0.77511 2	0.775112	7.072694	0.0239	1	0.68371 2	0.683712	6.331556	0.028 7	
Cemento*Arena	1	1.62075 7	1.620757	14.78899	0.0032	1	2.19428 6	2.194286	20.32031	0.000 9	
Cen-Anhi*Arena	1	0.09191 2	0.091912	0.838671	0.3813						
Model	5	5.05407 8	1.010816	9.223431	0.0017	4	4.96216 7	1.240542	11.48811	0.000 6	
Error	10	1.09592 2	0.109592			11	1.18783 3	0.107985			
(Lack of fit)	2	0.22925 5	0.114627	1.058099	0.3911	3	0.32116 7	0.107056	0.988205	0.445 8	
(Pure Error)	8	0.86666 7	0.108333			8	0.86666 7	0.108333			
Total	15	6.15				15	6.15				

La Tabla 8 indica que los efectos significativos son, cemento, arena y las interacciones cemento*cen-anhi y cemento*arena. De acuerdo con estos resultados, se establece que estos componentes de la mezcla tienen efecto significativo sobre la resistencia a la flexión.

El estadístico de Lack of fit (falta de ajuste) indica que el modelo experimental se ajusta adecuadamente a los datos de la variable de respuesta (Resistencia a la flexión) debido a que su valor de probabilidad (Pvalue=0.3911) es mayor al nivel de significancia ($\alpha=0.05$).

El modelo estadístico codificado de la variable de respuesta resistencia a la flexión se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 9

Modelo predictivo codificado para la resistencia a la flexión (MPa)

Coded Levels(-1,1)	
Flexión	= 2846.4*cemento - 112.2333*cen-anhi - 1827.567*arena + 4750*cemento*cen-anhi + 9600*cemento*arena

El modelo estadístico de la Tabla 9 de la variable de respuesta resistencia a la flexión tienen contribución positiva los componentes de la mezcla cemento y las interacciones cemento *cen-anhi y cemento*arena por sus coeficientes positivos.

El coeficiente de determinación del modelo planteado se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10

Cuadro de ajuste del modelo para la resistencia a la Flexión

	Master Model	Predictive Model
RMSE	0.331047	0.32861
R-square	82.18%	80.69%
Adjusted R-square	73.27%	73.66%
Coefficient of Variation	5.494557	5.454116

El valor del coeficiente de determinación R^2 , significa que el porcentaje de varianza explicada por el modelo es del 82.18 %.

En la Tabla 11 se observa los resultados del ajuste de optimización de los componentes de la mezcla para la variable de respuesta resistencia a la flexión (MPa).

Tabla 11

Establecimiento del perfil predictivo para resistencia a la flexión (MPa)

Factor	Label	Optimal Setting	Response	Estimated Value
Cemento	CEM	0.3548	FLEX	6.551888 [6.268588,6.835188]
Cen-Anhi	CENANHI	0.3676		
Arena	ARENA	0.2776		

En la Tabla 11 se muestra el perfil predictivo para la variable de respuesta resistencia a la flexión (MPa). Esta nos indica que para obtener un valor de resistencia a la flexión de 6.55 MPa, los componentes de la mezcla son: 35.48 % de cemento, 36.76 % de cen-anhi y 27.76 % de arena.

3.4. Verificación de las respuestas de resistencia a la compresión y flexión mediante determinación de la porosidad

Con la finalidad de contrastar las variables de respuestas de resistencia a la compresión y flexión

se determinó el comportamiento de la porosidad de los morteros, ya que estos poseen una relación inversamente proporcional, a mayor resistencia menor porosidad. Este comportamiento se observa en la Figura 3.

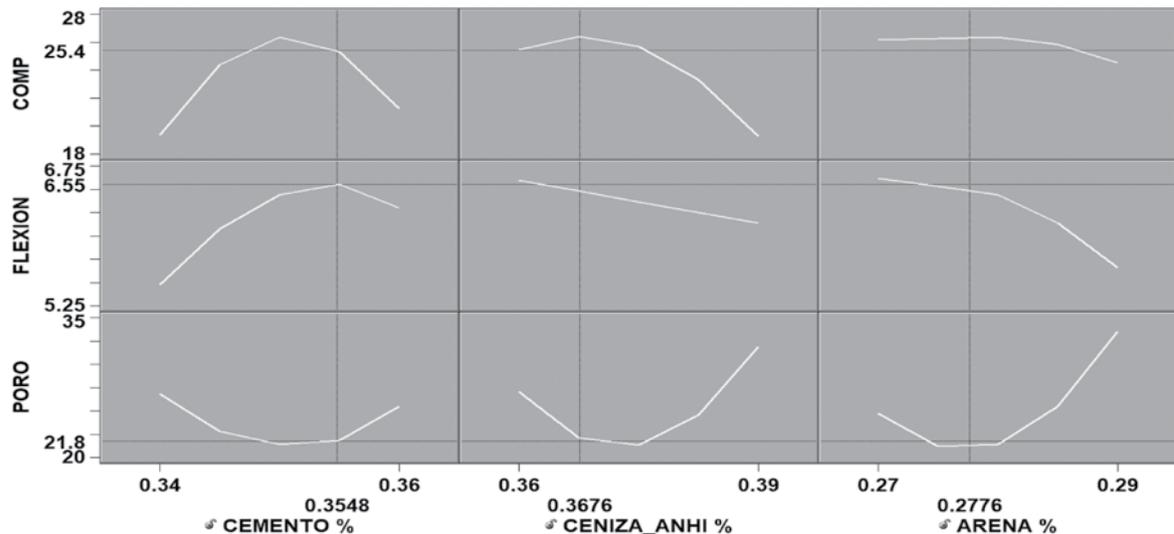


Figura 3. Comportamiento de la resistencia a la compresión, flexión y porosidad.

4. Conclusiones

La ceniza de cascarilla de arroz tiene que ser tratado a una temperatura de 750 °C y un tiempo de 3 h y 30 min. A estos valores, la ceniza es amorfa como se observa en la Figura 1 y esta tiene un contenido de sílice de 91.81 %.

Las variables de mayor influencia en la mezcla fueron los porcentajes optimizados de cada componente: cemento 35.48 %, ceniza-anhidrita 36.76 %, arena 27.76 %.

Al mezclar con los demás componentes (cemento y agua) aumenta la resistencia con un resultado a la compresión 28.5 MPa mejor de lo esperado. Siendo así apta para la elaboración de morteros por ser un buen material inorgánico y reemplazante del cemento.

Se formuló el diseño de mezclas con el Programa SAS y se obtuvo los siguientes modelos predictivos:

- Resistencia a la compresión 25.41 MPa, dentro de los límites de confianza entre 24.10 MPa a 26.72 MPa. Donde indica que contribuyen positivamente en la resistencia a compresión

el factor cemento y las interacciones cemento*cen-anhi y cemento *arena.

- Resistencia a la flexión 6.55 MPa, dentro de los límites de confianza entre 6.27 a 6.84 MPa donde se indica que para obtener un valor de resistencia a la flexión de 6.55 MPa, los componentes de la mezcla son: 35.48% de cemento, 36.76% de cen-anhi y 27.76% de arena.

5. Referencias bibliográficas

- Castro, C. M. J., Martínez, R. A. P., Zamora-Ledezma, C., & Zamora-Ledezma, E. (2021). Caracterización preliminar de la ceniza de cáscara de arroz de la provincia Manabí, Ecuador, para su empleo en hormigones. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*, 44(1), 44-50.
- Flores De La Rosa, V. M. (2015). Estudio de la resistencia a la compresión del hormigón con adición de polvo de vidrio reciclado (Bachelor's thesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2015.)

- Martirena, J. F. (2004) Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de Clinker de cemento Portland; el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. Tesis Doctoral, Universidad Central Martha Abreu de las Villas.
- Méndez, R. et al. (2010). Optimización de mezclas cal-puzolana destinadas a la construcción de materiales prefabricados no convencionales. Simposio Aprovechamiento de residuos agroindustriales como fuente sostenible de materiales de construcción, Valencia.
- Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., & Velázquez, S. (2003). Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes. *Cement and concrete research*, 33(4), 603-609.
- Vanderley M. (2002), On the sustainability of the Concrete. Extended version of the paper commissioned by UNEP Journal Industry and Environment
- Vasquez, R. y Vach Vigil, P. (2000). Las cenizas de cascara de arroz; Adición puzolanica en cemento y concreto. Universidad de Piura. Piura, Perú.

Influencia de la adición de pavimento asfáltico reciclado en el desempeño a la humedad y deformación permanente de mezclas asfálticas

Juan Olivera¹, Jahel S. Ledezma^{1,*}

¹Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*sarvialedezma@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

El uso de materiales vírgenes para la elaboración de mezclas asfálticas en Bolivia es una práctica generalizada. Si bien a nivel internacional ya se emplea Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) en el diseño de mezclas por sus beneficios en la conservación de recursos naturales y reducción de energía, a nivel nacional aún no se ha validado experimentalmente el desempeño de mezclas asfálticas que incluya porcentajes de este material en su diseño. De esta forma, la presente investigación evaluó la influencia de la adición de porcentajes de RAP en el desempeño a la humedad y deformación permanente de mezclas asfálticas. Para esto, se realizaron ensayos de tracción indirecta y rueda de Hamburgo de las mezclas asfálticas elaboradas: una con materiales vírgenes y otras con porcentajes del 15, 20 y 25% de RAP, previo análisis de sus características y su combinación con materiales vírgenes. Los resultados demostraron que las mezclas con adición de RAP presentaron un desempeño igual o superior en comparación con la mezcla elaborada únicamente con materiales nuevos. Específicamente, la mezcla con un 15% de RAP mostró resultados similares en cuanto a susceptibilidad a la humedad y deformación permanente. Las mezclas con un 20% y 25% de RAP presentaron un aumento del 6,2% y 1,8% en la resistencia a la humedad, respectivamente, y una reducción del 37% y 39% en la deformación permanente, ambos en comparación con la mezcla asfáltica original. Estos resultados respaldan la viabilidad y conveniencia de considerar la inclusión de materiales reciclados en el diseño de pavimentos asfálticos.

Palabras clave: *Pavimento Asfáltico, RAP, Desempeño de mezclas asfálticas, Susceptibilidad a la humedad, Deformación permanente.*

Abstract

The use of virgin materials for the production of asphalt mixes in Bolivia is a widespread practice. Although Recycled Asphalt Pavement (RAP) is already used internationally in the design of mixes due to its benefits in the conservation of natural resources and energy reduction, at the national level the performance of asphalt mixes that includes percentages has not yet been experimentally validated. of this material in your design. In this way, the present investigation evaluated the influence of the addition of RAP percentages on the performance to humidity and permanent deformation of asphalt mixtures. For this, indirect traction and Hamburg wheel tests were carried out on the asphalt mixtures made: one with virgin materials and others with percentages of 15, 20 and 25% of RAP, after analyzing their characteristics and their combination with virgin materials. The results showed that the mixtures with the addition of RAP presented an equal or superior performance compared to the mixture made only with new materials. Specifically, the 15% RAP mix showed similar results in terms of moisture susceptibility and permanent deformation. Mixtures with 20% and 25% RAP showed a 6.2% and 1.8% increase in moisture resistance, respectively, and a 37% and 39% reduction in permanent deformation, both compared with the original asphalt mix. These results support the feasibility and convenience of considering the inclusion of recycled materials in the design of asphalt pavements.

Key words: *Asphalt Pavement, RAP, Performance of asphalt mixes, Susceptibility to humidity, Permanent deformation.*

1. Introducción

Es conocido que, las redes viales pavimentadas con asfalto constituyen uno de los pilares fundamentales de la economía de cada país. Estas carreteras permiten aumentar la productividad y fomentar el crecimiento económico. Sin embargo, están sujetas a la constante acción del tráfico y el medioambiente, factores que, combinados con las propiedades intrínsecas del material, los procesos constructivos y la calidad de la mano de obra, ocasionan su deterioro progresivo. Esto conlleva a una reducción de su vida útil, lo que a su vez implica una mayor frecuencia de mantenimiento en las vías, aumentando los costos y los recursos necesarios para su conservación, rehabilitación y reconstrucción. Además, este proceso genera un significativo incremento en la generación de escombros (Ochoa, 2021).

Actualmente, en nuestro país no se tiene un adecuado mantenimiento preventivo, derivando directamente en la rehabilitación de las redes carreteras pavimentadas, en la cual, se retira el material existente y se reemplaza por material nuevo. Sin embargo, el material que se retira de la capa de rodadura, presenta características tecnológicas superiores al resto de la estructura del pavimento, lo cual puede ser reutilizado futuramente en la misma estructura. al ser este empleado en la capa de rodadura de la estructura. Es así que, desde hace muchos años se ha buscado la implementación de métodos que reduzcan los costos y los daños ambientales, que estas prácticas generan, siendo una de las soluciones el Pavimento Reciclado Asfáltico (RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*).

El RAP surgió de la necesidad de eliminar de forma útil los materiales de los revestimientos antiguos, para que

no se apilen en los vertederos. Parte de este principio consiste también en optar por una medida que no perjudique, sino que proteja, el medio ambiente. Otro factor para la aplicación de esta técnica es el ahorro de recursos naturales, el menor consumo de energía, la menor emisión de gases y la menor necesidad de espacios físicos en vertederos (Canchanya, 2017).

Otros países han logrado resultados exitosos con el uso de mezclas asfálticas con adición de RAP, mismos que tienen por normativa incluir un cierto porcentaje de RAP al momento de construir, rehabilitar y/o expandir su longitud de sus carreteras, gracias a su buen comportamiento en el desempeño, que son similares o superiores aquellos que se construyen con el 100% de materiales nuevos, a esto se suma los beneficios económicos y el cuidado al medio ambiente.

2. Materiales y métodos

En este estudio, se realizaron análisis exhaustivos para evaluar las características y propiedades de los materiales utilizados con el fin de determinar su idoneidad para su aplicación en mezclas asfálticas. Los materiales se dividieron en tres categorías principales: agregados minerales, cemento asfáltico y caracterización del RAP.

2.1 Caracterización de los agregados minerales vírgenes

Los agregados utilizados en la presente investigación provienen del acopio de agregados de Sacaba. En la Tabla 1, se detalla los ensayos realizados para la caracterización de los agregados minerales nuevos.

Tabla 1

Caracterización de los agregados minerales vírgenes

Ensayo	Unidad	Norma	Límite	Resultado	Verificación
Agregado Grueso					
Gravedad específica del agregado grueso	g/cm ³	ASTM C127	-	2,77	-
Abrasión de los Ángeles	%	ASTM C131	Máx 40%	30,03	Cumple
Caras fracturadas	%	ASTM D5821	Min 90%	80	No cumple
Resistencia a los sulfatos (Sanidad)	%	ASTM C2419	Máx 12%	10,58	Cumple
Agregado Fino					
Gravedad específica del agregado fino	g/cm ³	ASTM C128	-	2,63	-
Equivalente de arena	%	ASTM D2419	Min 45%	86,16	Cumple

Fuente: Autores

2.2 Caracterización del cemento asfáltico

El cemento asfáltico empleado para la investigación es de procedencia peruana, con una clasificación

por penetración 85/100. Para la caracterización del cemento asfáltico se realizó los ensayos presentados en la Tabla 2.

Tabla 2

Caracterización del cemento asfáltico virgen

Ensayo	Unidad	Norma	Límite	Resultado 85/100	Verificación
Penetración a 25°C	mm	ASTM D5	Mín. 80	80,92	Cumple
Peso específico del asfalto a 25°C	g/cm ³	ASTM D71	-	1,022	-
Ductilidad a 25°C	cm	ASTM D113	Mín. 100	102,33	Cumple
Recuperación elástica a 25°C	%	ASTM D6084	Mín. 90	83,70	No cumple
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D36	45 - 52	45,10	Cumple
Punto de inflamación	°C	ASTM D92	Mín. 230	314,60	Cumple
Adhesividad agregado grueso con el cemento asfáltico	%	DNER-ME 078	Min 95	97,58 (con 0,09% de mejorador de adherencia)	Cumple

Fuente: Autores

2.3 Caracterización de los materiales componentes del RAP disponible

La Tabla 3, presenta los resultados de los ensayos de caracterización al cemento asfáltico y agregado mineral recuperado del RAP. Para esto, el RAP

utilizado en las nuevas mezclas fue inicialmente disgregado y tamizado, desechando todo material mayor a 19 mm para evitar segregaciones en la mezcla resultante o producir una mala compactación, que podría ocasionar exceso de vacíos en los cuerpos de prueba.

Tabla 3

Caracterización de los materiales componentes del RAP disponible

Ensayo	Unidad	Norma	Límite	Resultado	Verificación
Cemento asfáltico recuperado					
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D36	45-52	55,70	No cumple
Agregado mineral recuperado					
Gravedad específica neta del agregado recuperado (Gsb)	-	<i>Instituto del Asfalto</i>	-	2,473	-
Caras fracturadas	%	ASTM D5821	Min. 90%	95	Cumple
Determinación de la forma de los fragmentos de roca triturada	%	NBR-5564	Cúbica Alargada Laminar	78 17 5	-
Gravedad específica neta del agregado recuperado (Gsb)	-	<i>Instituto del Asfalto</i>	-	2,473	-
Equivalente de arena	%	ASTM D2419	Min. 45%	71,18	Cumple

Fuente: Autores

Posteriormente, se realizó el diseño de las mezclas propuestas y la evaluación del desempeño a la susceptibilidad a la humedad y deformación permanente.

2.4 Diseño de mezcla asfáltica convencional y la adicionado con RAP

La mezcla convencional se dosificó utilizando la metodología Marshall, conforme a las especificaciones del Instituto del Asfalto (2004a).

Se definió una única gradación de áridos seleccionada, para la mezcla convencional y las adicionadas con RAP. Posteriormente, para definir el contenido óptimo de cemento asfáltico de cada mezcla, se evaluaron cinco contenidos diferentes de asfalto según diversos criterios volumétricos del método Marshall y de resistencia según la categoría de tránsito seleccionada para el diseño.

Para abordar el caso específico de las mezclas que contienen adición de RAP, se llevaron a cabo ajustes en el diseño volumétrico en función del porcentaje de RAP incorporado. Estos ajustes son necesarios debido a que el RAP no solo contribuye con agregado recuperado, sino que también contiene un porcentaje de cemento asfáltico envejecido. En relación a la curva

granulométrica del agregado recuperado, se realizó un ajuste utilizando agregado mineral nuevo (Tabla 4), asegurando así el cumplimiento de los límites granulométricos establecidos en la especificación ABC, específicamente en la faja “C” (Figura 1). Además, se determinó la densidad máxima teórica (Gmm) del RAP, lo que permitió calcular la gravedad específica de los agregados del RAP. Este valor es crucial para el parámetro de diseño VAM (porcentaje de vacíos en el agregado mineral), ya que requiere información precisa sobre la gravedad específica de los agregados combinados. Por último, se determinó el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para mezclas asfálticas que contienen un 15%, 20% y 25% de adición de RAP.

Tabla 4
Granulometrías adoptadas para el diseño de las mezclas asfálticas evaluadas

Abertura (mm)	Abertura (pulgadas)	Faja granulométrica		Granulometrías de las mezclas asfálticas			
		Superior	Inferior	MAC	MA-15% RAP	MA-20% RAP	MA-25% RAP
19.000	3/4	100	97	100	100	100	100
12.500	1/2	88	76	82,7	85,4	85,1	85,7
9.500	3/8	80	68	69,9	74,1	73,4	74,4
4.750	N4	59	49	50,5	54,8	54,5	55,7
2.360	N8	45	36	35,7	40,4	40,1	41
1.180	N16	31	22,6	24,6	29,3	29,1	29,7
0.700	N30	25,3	17,1	17,4	21,6	21,5	22
0.300	N50	16,6	10,1	11,9	15	15	15,5
0.150	N100	10,2	5,4	6,6	8,4	8,5	8,9
0.075	N200	7	3	3	4,9	4,7	4,8

Fuente: Autores

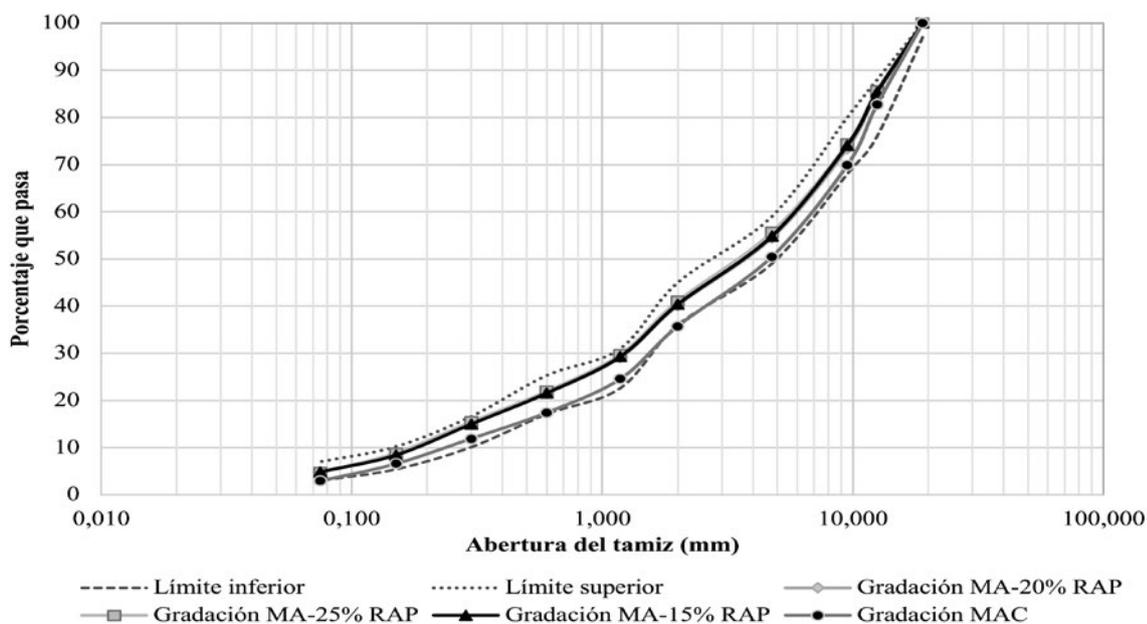


Figura 1. Curva granulométrica de las distintas mezclas asfálticas evaluadas.

2.5 Ensayo de susceptibilidad a la humedad

Para la evaluación de la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas diseñadas se empleó la norma ASTM 4867 (2014). Se consideraron mezclas asfálticas convencionales y aquellas adicionadas con 15%, 20% y 25% de RAP, todas ellas dosificadas con los contenidos óptimos de cemento asfáltico obtenidos mediante el método volumétrico Marshall.

Para cada tipo de mezcla, se moldearon seis especímenes con un diámetro de 102 mm y una altura de 63,5mm, asegurando que los especímenes de prueba presentaran un volumen de vacíos entre el 6% y el 8%, para lo cual se utilizó un compactador giratorio.

Posteriormente, las probetas se dividieron en dos grupos (húmedo y seco) y se llevaron a rotura para determinar la resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral. El grupo húmedo, conformado por tres probetas, fue sometido a un proceso de acondicionamiento previo. Este proceso consistió en la saturación de las probetas con agua destilada al 55-80% de su capacidad mediante una bomba de vacío, seguido de un sumergimiento en baño de agua a 60°C durante 24 horas. Una vez finalizado este tiempo, las probetas se trasladaron a otro baño de agua a 25°C durante una hora. Al mismo tiempo, el grupo seco fue acondicionado a 25°C durante 20 minutos. Una vez concluido el acondicionamiento, se procedió a realizar la ruptura de las probetas aplicando una carga diametral hasta alcanzar la carga máxima (P). En este

punto se determinó la resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral.

2.6 Ensayo de deformación permanente

La evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente se llevó a cabo siguiendo las pautas establecidas en la norma AASHTO T324 (2004). Se utilizaron cuerpos de prueba para la mezcla asfáltica convencional y la mezcla adicionada con RAP. Estos cuerpos de prueba se elaboraron utilizando el compactador giratorio SUPERPAVE hasta lograr un índice de vacíos entre el 7% y el 8%. Las dimensiones de los cuerpos de prueba fueron de 150 mm de diámetro y 62 mm de altura, con una tolerancia de ± 2 mm tanto para el diámetro como para la altura. Se realizaron un total de 4 cuerpos de prueba para cada tipo de diseño. En cuanto al ensayo de deformación permanente, se estableció un límite de 20.000 pasadas en la rueda de Hamburgo o hasta alcanzar una deformación máxima de 20 mm, a una temperatura de ensayo estándar de 50°C.

3. Resultados

3.1 Diseño de la mezcla asfáltica convencionales y la adicionada con RAP

En la Tabla 5 se presentan los resultados de los parámetros volumétricos del diseño Marshall, junto con la rigidez obtenida. Además, se indica el porcentaje óptimo de cemento asfáltico determinado para cada uno de los diseños, siguiendo las recomendaciones de diseño establecidas por el Instituto del Asfalto (2014).

Tabla 5
Resultados obtenidos del diseño volumétrico de las mezclas asfálticas

Parámetros volumétricos	Unidad	Requerimiento Instituto del Asfalto	Tipos de mezclas asfálticas			
			MAC	MA-15% RAP	MA-15% RAP	MA-15% RAP
Contenido de cemento asfáltico óptimo	%	-	5,1	5,0	4,5	4,4
Vacíos de aire en la mezcla compactada "Va"	%	3 - 5	4,0	4,0	3,5	3,5
Vacíos en agregado mineral "VMA"	%	Min. 14	11,2	7,9	10,8	11,3
Vacíos llenos de asfalto "VFA"	%	65-75	66,0	47,3	67,1	67,9
Estabilidad	N	Min. 8006	14493,3	16188,5	17493,0	17494,5
Flujo	0,25 mm	8 - 14	10,7	12,2	11,9	14,0
Densidad	Kg/m ³	-	2378,7	2332,5	2362,4	2341,7
Rigidez Marshall	KN/mm	3 - 6	1,28	1,33	1,50	1,46

Fuente: Autores

3.2 Evaluación de la susceptibilidad a la humedad

En la Tabla 6 se muestran los resultados de la resistencia conservada “TSR”, así como los resultados de los grupos seco (Std) y húmedo (Stm) para los distintos diseños realizados, mismos que cumplieron con el mínimo requerido de 80%.

Tabla 6
Resultados obtenidos del ensayo de susceptibilidad a la humedad

Tipo de mezcla asfáltica	Porcentajes de Cemento asfáltico	Grupo de evaluación	Porcentaje de vacíos en la mezcla (Va)	Resistencia a la tracción indirecta (KPa)	Resistencia a la humedad (%)
Convencional	5,1	Seco	6,8	636,6	80,6
		Acondicionado	6,9	512,8	
MA-15% RAP	5,0	Seco	7,2	721,1	80,1
		Acondicionado	7,3	577,8	
MA-20% RAP	4,5	Seco	7,5	788,8	85,9
		Acondicionado	7,4	677,6	
MA-25% RAP	4,4	Seco	6,9	728,0	82,1
		Acondicionado	7,1	597,4	

Fuente: Autores

La Figura 2 presenta la resistencia a la tracción indirecta de los grupos evaluados en el ensayo de susceptibilidad a la humedad.

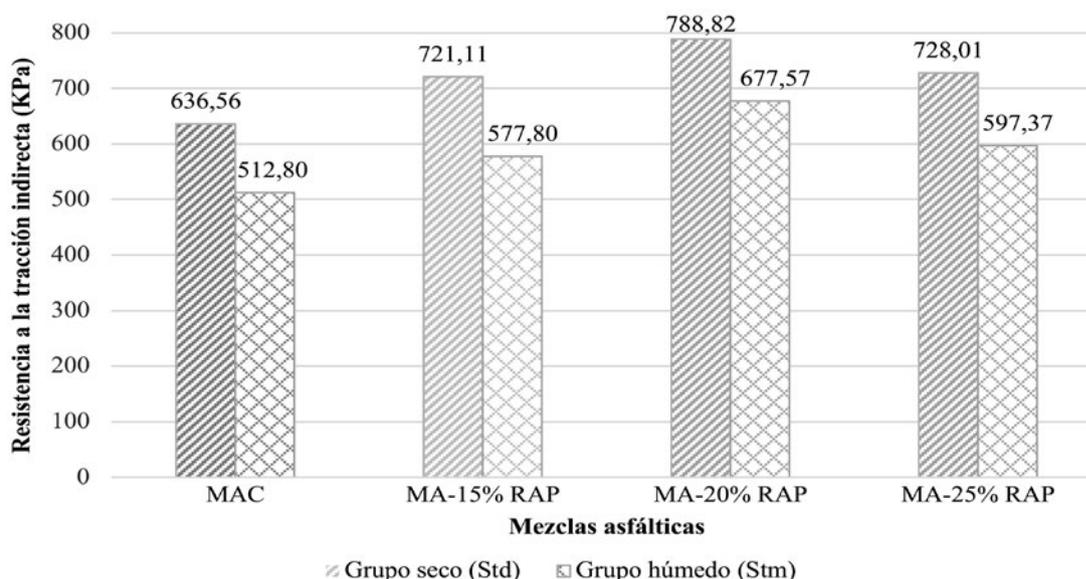


Figura 2. Resistencia a la tracción indirecta de las mezclas asfálticas evaluadas.

Se puede observar en la Figura 2 que la mezcla asfáltica convencional desarrolla menor resistencia a la tracción indirecta en comparación a las mezclas asfálticas con de adición de RAP, tanto en el grupo seco (Std) y húmedo (Stm).

Los resultados de la resistencia a la humedad “TSR”, de las mezclas asfálticas evaluadas en el trabajo de investigación es presentada en la Figura 3.

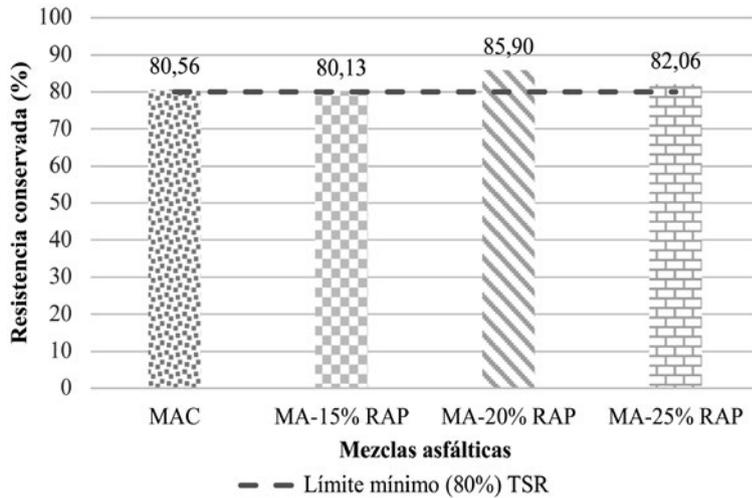


Figura 3. Resistencia a la humedad en las mezclas asfálticas evaluadas.

En la Figura 3 se observa que las mezclas asfálticas con 20% y 25% de adición de RAP desarrolla mayor resistencia a la susceptibilidad a la humedad en relación a la mezcla asfáltica convencional y la adicionada con 15% de RAP.

3.3 Evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente

Los resultados obtenidos de las mezclas asfálticas evaluadas en el ensayo de susceptibilidad a la deformación permanente mediante la rueda de Hamburgo se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7
Resultados obtenidos del ensayo de la rueda de Hamburgo

Tipo de mezcla asfáltica	Porcentaje de cemento asfáltico	Rueda	Número de pasadas al punto de stripping	Tipo de falla	Ahuellamiento desarrollado	Media de ahuellamiento
Convencional	5,1	1	6271	Número de pasadas	20,45	20,24
		2	8229		20,03	
MA-15% RAP	5,0	1	3628	Número de pasadas	20,69	20,32
		2	3017		19,95	
MA-20% RAP	4,5	1	-	Número de pasadas	16,14	14,88
		2	9987		13,61	
MA-25% RAP	4,4	1	10800	Número de pasadas	14,87	14,46
		2	12000		14,04	

Fuente: Autores

Según los resultados obtenidos, se pudo observar que la mezcla asfáltica convencional y la mezcla adicionada con un 15% de RAP presentan una menor resistencia a la deformación permanente en comparación con las mezclas asfálticas que contienen un 20% y un 25% de RAP. La curva de deformación en función del número de pasadas para la mezcla asfáltica convencional dosificada con un 100% de materiales vírgenes y la mezcla asfáltica adicionada con un 15% de RAP muestra que alcanzaron el punto de desgranamiento a las 7200 y 3300 pasadas, respectivamente. Esto contribuyó a aumentar la tasa de

deformación, llegando a una deformación máxima de 20 mm a las 10.000 pasadas. Por otro lado, se observó que la curva de deformación en función del número de pasadas para las mezclas asfálticas adicionadas con un 20% y un 25% de RAP alcanzaron el punto de desgranamiento a las 10.000 y 11.400 pasadas, respectivamente. A diferencia de las mezclas asfálticas anteriores, estas últimas cumplieron con las 20.000 pasadas y presentaron una deformación permanente considerablemente menor en comparación con la mezcla asfáltica convencional (Figura 4).

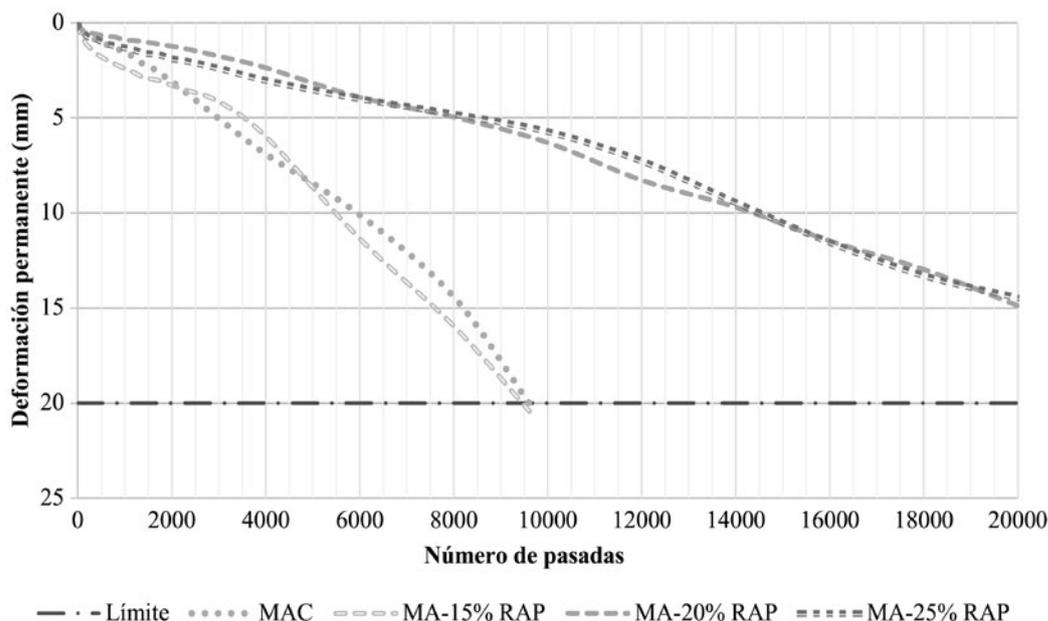


Figura 4. Deformación permanente de las mezclas asfálticas evaluadas.

La Figura 5 ilustra el promedio de los resultados obtenidos del ensayo de deformación permanente para cada una de las mezclas asfálticas elaboradas,

así mismo la reducción de cemento asfáltico virgen a mayor porcentaje de adición de RAP en las mezclas asfálticas.

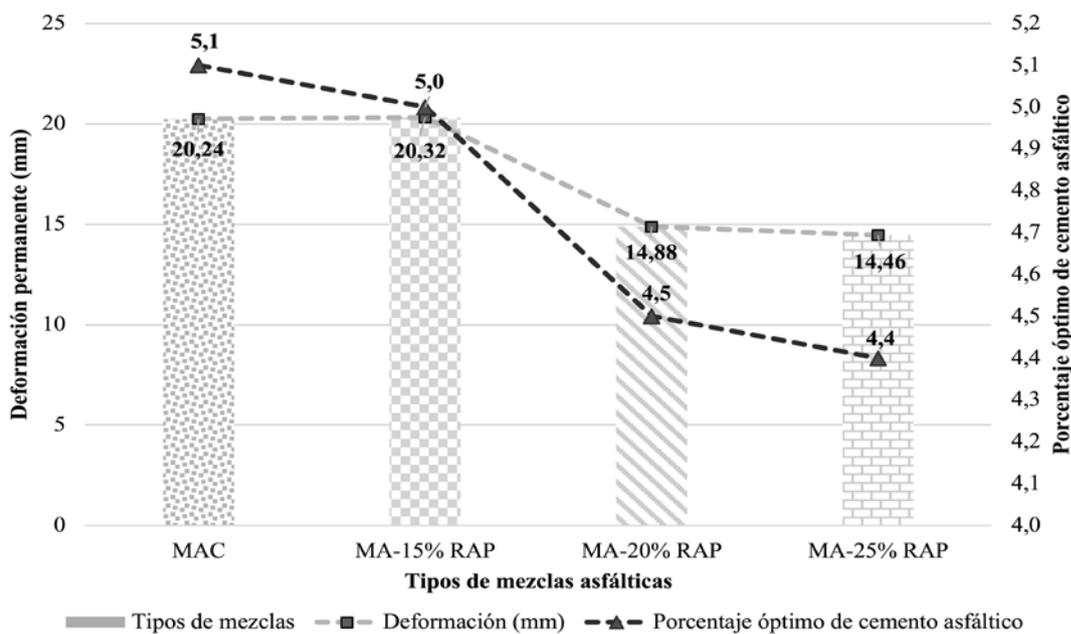


Figura 5. Resultados del ensayo de deformación permanente y porcentaje óptimo de cemento asfáltico de las mezclas asfálticas evaluadas.

4. Conclusiones

Al evaluar la resistencia a la susceptibilidad a la humedad, se observa que tanto la mezcla asfáltica

convencional como la mezcla adicionada con RAP muestran resultados similares. Sin embargo, se observa un incremento del 6,2% y 1,8% en la mezcla asfáltica con adición de 20% y 25% de RAP, respectivamente.

Se ha demostrado que a medida que se aumenta el porcentaje de RAP en la mezcla asfáltica, se reduce la deformación permanente en comparación con la mezcla asfáltica convencional elaborada con 100% de materiales nuevos. En el caso de la mezcla MA-15% RAP, la deformación permanente fue similar a la mezcla convencional, pero ambas mezclas no cumplieron con las 20.000 pasadas, alcanzando una deformación máxima de 20 mm a las 10.000 pasadas. Además, ambas mezclas presentaron puntos de desgranamiento, lo cual contribuyó a un aumento en la tasa de deformación.

En cuanto a la mezcla MA-20% RAP, se observó una reducción del 37% en la deformación permanente, mientras que para la mezcla MA-25% RAP, la reducción fue del 39%. Estas dos últimas mezclas cumplieron con los límites especificados norma AASHTO T324, es decir, alcanzaron las 20.000 pasadas o los 20 mm de deformación permanente.

5. Recomendaciones

Se recomienda incorporar RAP en las nuevas mezclas mediante dosificaciones adecuadas, ya que esto mejora significativamente el comportamiento de las mezclas en términos de resistencia a la deformación permanente. La deformación permanente es una de las fallas más comunes en los pavimentos a nivel nacional. Por lo tanto, la inclusión de RAP en las mezclas puede ayudar a mitigar este problema y mejorar la durabilidad de los pavimentos.

Agradecimientos

Agradecimiento especial al Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos por brindar los medios necesarios por los cuales fue posible ejecutar este proyecto.

6. Referencias bibliográficas

- AASHTO T 324. (2004). *Standard Method of Test for Hamburg Wheel Tracking Testing of Compacted Hot Mix Asphalt*. USA. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ABC. (2011). *Manual de especificaciones técnicas de construcción*. Administradora Boliviana de Carreteras. Bolivia.
- ASTM D4867. (2014). *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Pavement Mixtures*. USA. American Society of Testing and Materials.
- Canchanya, J. (2017). *Avaliação do comportamento mecânico e reológico de mistura asfáltica com adição de 20% de material fresado – RAP*. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, Brasil.
- Instituto del Asfalto. (2014). *Marshall Method of Mix Design (7th Edition)*. Asphalt Mix Design Methods (Chapter 7, p. 77).
- Instituto del Asfalto. (2014a). *Recycled Asphalt Materials in the Mix Design Process (7th Edition)*, Asphalt Mix Design Methods (Chapter 11, p. 135).
- Ochoa, L. (2021). *Mezclas asfálticas con RAP (Sesión de congreso)*. 1er Congreso Académico del Asfalto AMAAC, Tlalpan, México. https://www.odoo.com/es_ES/typo?domain=itafec-mexico.odoo.com&autodbname=itafec-mexico&hosting=eu164a.

Optimización del desempeño de mezclas asfálticas en caliente mediante la incorporación de aditivo mejorador de adherencia a base de organosilanos

Juan Sandagorda¹, Jahel S. Ledezma^{1,*}

¹Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*sarvialedezma@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

El desprendimiento de agregados de la superficie del pavimento mediante la presencia del agua es un problema recurrente. Las características de los agregados, su naturaleza, mineralogía y porosidad, pueden afectar este fenómeno. Si bien se plantea la incorporación de mejoradores de adherencia como una solución en la etapa de diseño, es necesario evaluar su impacto en el desempeño de la mezcla. De esta forma, la presente investigación analizó la influencia de un aditivo mejorador de adherencia a base de organosilanos en el desempeño de las mezclas asfálticas. Se dosificaron mezclas asfálticas siguiendo la metodología Marshall, evaluando la dosis óptima de aditivo de adherencia a incorporar en las mezclas asfálticas convencionales y modificadas. Esto se realizó mediante ensayos de adherencia entre el agregado grueso y el ligante, utilizando diferentes concentraciones de aditivo (0.03%, 0.05% y 0.07%). Los resultados mostraron que la dosis óptima de aditivo fue del 0.07% para ambas mezclas asfálticas. Posteriormente, se evaluó la susceptibilidad a la humedad mediante la norma ASTM D4867 y la deformación permanente utilizando la rueda de Hamburgo, siguiendo la norma AASHTO T324. Al analizar los resultados de estos ensayos, se observó que las mezclas asfálticas convencionales y modificadas con la adición del aditivo mejorador de adherencia a base de organosilanos al 0.07% presentaron un aumento del 10.61% y 9.95% en resistencia a la humedad, respectivamente, y una disminución del 32.30% y 40.04% en la deformación permanente en comparación con las mezclas convencionales y modificadas sin aditivo de adherencia.

Palabras clave: *Aditivo mejorador de adherencia, Mezcla asfáltica convencional, Mezcla asfáltica modificada.*

Abstract

The detachment of aggregates from the pavement surface due to the presence of water is a recurring problem. The characteristics of the aggregates, such as their nature, mineralogy and porosity, can affect this phenomenon. Although the incorporation of adhesion improvers is considered as a solution in the design stage, it is necessary to evaluate their impact on the performance of the mixture. In this way, the present investigation analyzed the influence of an organosilane-based adhesion improver additive on the performance of asphalt mixes. Asphalt mixes were dosed following the Marshall methodology, evaluating the optimal dose of adhesion additive to be incorporated into conventional and modified asphalt mixes. This was done by adhesion tests between the coarse aggregate and the binder, using different concentrations of additive (0.03%, 0.05% and 0.07%). The results showed that the optimal dose of additive was 0.07% for both asphalt mixtures. Subsequently, the susceptibility to humidity was evaluated using the ASTM D4867 standard and the permanent deformation using the Hamburg wheel, following the AASHTO T324 standard. When analyzing the results of these tests, it was observed that the conventional and modified asphalt mixes with the addition of the 0.07% organosilane-based adhesion improving additive presented an increase of 10.61% and 9.95% in resistance to humidity, respectively, and a 32.30% and 40.04% decrease in permanent deformation compared to conventional and modified mixtures without adhesion additive.

Key words: *Adhesion improver additive, Conventional asphalt mix, Modified asphalt mix.*

1. Introducción

El daño ocasionado por la presencia de humedad en las mezclas asfálticas conlleva a la degradación de su capacidad estructural. Este fenómeno, conocido como deterioro por humedad, se origina debido a la penetración del agua en la microestructura de la mezcla asfáltica. Sus manifestaciones más habituales incluyen el “*stripping*”, que se refiere al desprendimiento o decapado de la capa superior de la mezcla asfáltica, y el “*raveling*”, que corresponde al desmoronamiento gradual de la capa inferior de la mezcla, provocado por el constante tráfico de vehículos (Caro & Alvarez, 2011).

En Bolivia, este tipo de deterioro es frecuente, ya que según un comunicado de la ABC (El Deber, 2019), casi el 80% de las carreteras en el país se ven afectadas por el impacto del agua debido a las lluvias.

Es importante destacar que, a pesar de que las Especificaciones de Construcción en Bolivia (ABC, 2011) hacen referencia al uso de aditivos de adherencia como parte de la validación de los materiales utilizados en las mezclas asfálticas, no se requiere la verificación del diseño preliminar de la mezcla posterior al diseño Marshall (*Asphalt Mix Design Methods*, 2014). Esta verificación es un requisito en otros países, como Colombia y México (INVIAS 2013, AMAAC 2013), donde se evalúa la susceptibilidad de la mezcla a la humedad. Esta evaluación respalda de manera efectiva la necesidad de mejorar la adherencia de la estructura mediante la incorporación de un aditivo mejorador de adherencia y/o un llenante adecuado.

Estos aditivos, generalmente denominados “mejoradores de adherencia,” presentan en sus moléculas dos grupos simultáneos: un grupo hidrocarbonado de baja o nula polaridad que es compatible con el asfalto y un segundo grupo funcional altamente polar que se adhiere al árido, creando un puente o enlace entre estos componentes (Botasso *et al.*, 2020). La mayoría de los aditivos mejoradores de adherencia son compuestos amínicos que se hidrolizan cuando el asfalto con el aditivo entra en contacto con la humedad presente en los áridos. En este sentido, los mejoradores de adherencia de última generación actúan a escala nanométrica y están compuestos de organosilanos. Los organosilanos son moléculas puente reactivas que modifican permanentemente la superficie del agregado inorgánico, convirtiéndola en una superficie orgánica altamente compatible con el asfalto. Esta modificación se lleva a cabo mediante enlaces químicos, lo que resulta en una nueva interacción entre el asfalto y el agregado, expulsando el aire y formando una unión integral (Zydex, 2015).

2. Métodos y materiales

2.1 Caracterización de los agregados pétreos

Los agregados pétreos utilizados en esta investigación fueron obtenidos de la localidad de Villa Tunari, ubicada en el río Espíritu Santo. Se emplearon cinco tipos de tamaños de agregados (19-16 mm, 16-11 mm, 11-5 mm, 5-3 mm, 3-0 mm y polvo mineral) para el diseño de las mezclas. Se llevaron a cabo una serie de ensayos descritos en la Tabla 1 con el fin de determinar las propiedades y características de los agregados pétreos.

Tabla 1
Caracterización de los agregados pétreos

Ensayo	Unidad	Norma	Limite	Resultado	Verificación
Agregado Grueso					
Gravedad específica del agregado grueso	g/cm ³	ASTM C127	-	2.62	-
Abrasión de los Ángeles	%	ASTM C131	Máx 40%	21.93	Cumple
Caras fracturadas	%	ASTM D5821	Min 90%	95.10	Cumple
Resistencia a los sulfatos (Sanidad)	%	ASTM C2419	Máx 12%	5.29	Cumple
Agregado Fino					
Gravedad específica del agregado fino	g/cm ³	ASTM C128	-	2.58	-
Equivalente de arena	%	ASTM D2419	Min 45%	72.55	Cumple

Fuente: Autores

2.2 Caracterización del cemento asfáltico

Se utilizaron dos tipos de cementos asfálticos en esta investigación: uno clasificado con penetración 60/70 y otro modificado con polímeros SBS (Estireno

Butadieno Estireno). Los ensayos realizados para caracterizar estos cementos se presentan en la Tabla 2, donde se muestran los resultados obtenidos en el laboratorio en comparación con las normas utilizadas.

Tabla 2

Caracterización del cemento asfáltico

Ensayo	Unidad	Norma	Límite	Cemento asfáltico		Verificación
				60/70	SBS	
Penetración a 25°C	mm	ASTM D5		62.33 (Min 60)	56.83 (Min 40)	Cumple
Peso específico del asfalto a 25°C	g/cm ³	ASTM D71	-	1.000	0.998	-
Ductilidad a 25°C	cm	ASTM D113	Min 100	125.20	86.14	Cumple
Recuperación elástica a 25°C	%	ASTM D6084	Min 50	93.80	87.20	Cumple
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D36	-	45.80	71.50	-
Punto de inflamación	°C	ASTM D92	Min 230°C	332.60	306.60	Cumple
Adhesividad del cemento asfáltico y el agregado fino		INVIAS E744	Min 4	10	10	Cumple

Fuente: Autores

2.3 Composición granulométrica

La composición granulométrica de los agregados para la mezcla asfáltica se ajustó a los límites establecidos por los requisitos de gradación para mezclas asfálticas, según las especificaciones técnicas de la Administración Boliviana de Carreteras (ABC, 2011). Se evaluaron dos combinaciones granulométricas, siendo el primer diseño una mezcla asfáltica convencional compuesta por 18% del tamaño de

agregado 19-16 mm, 10% del tamaño de agregado 16-11 mm, 15% del tamaño de agregado 11-5 mm, 8% del tamaño de agregado 5-3 mm, 48% del tamaño de agregado 3-0 mm y 1% de Filler. El segundo diseño empleó una combinación con 17% del tamaño de agregado 19-16 mm, 10% del tamaño de agregado 16-11 mm, 14% del tamaño de agregado 11-5 mm, 10% del tamaño de agregado 5-3 mm y 49% del tamaño de agregado 3-0 mm. Ambas propuestas se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3

Gradación de la combinación granulométrica de los diseños establecidos

Tamiz	Abertura	Grad. densa Convencional	Grad. densa Modificada	Gradación faja "C"		Tolerancia	Gradación faja "C" + Tolerancia	
				Inf.	Sup.		Inf.	Sup.
in	mm							
1"	25	100	100	100	100	±7	93	107
3/4"	19	100	100	97	100	±7	90	107
1/2"	12.5	79.9	79.9	76	88	±7	69	95
3/8"	9.5	67.9	67.9	68	80	±7	61	87
N.º 4	4.8	52.5	52.5	49	59	±5	44	64
N.º 8	2	41.2	41.2	36	45	±5	31	50
N.º 16	1.2	29.3	29.3	22.6	31	±5	17.6	36
N.º 30	0.6	21.4	21.4	17.1	25.3	±5	12.1	30.3
N.º 50	0.3	14.2	14.2	10.1	16.6	±5	5.1	21.6
N.º 100	0.2	6.6	6.6	5.4	10.2	±3	2.4	13.2
N.º 200	0.1	2.25	2.25	3	7	±2	1	9

Fuente: Autores

La Figura 1 muestra las franjas granulométricas de la gradación “C”, que confirman que la mezcla asfáltica convencional cumple con los límites propuestos por la ABC.

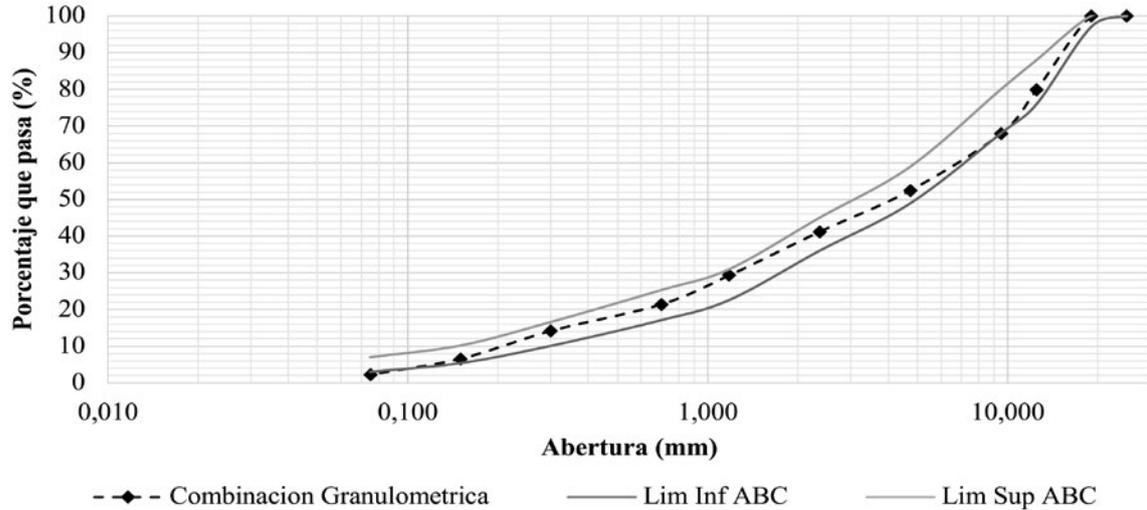


Figura 1. Curva granulométrica de las combinaciones para una mezcla asfáltica convencional.

Del mismo modo, la Figura 2 presenta la composición granulométrica de la mezcla asfáltica modificada, la cual también se ajusta a los límites de la normativa nacional de la ABC.

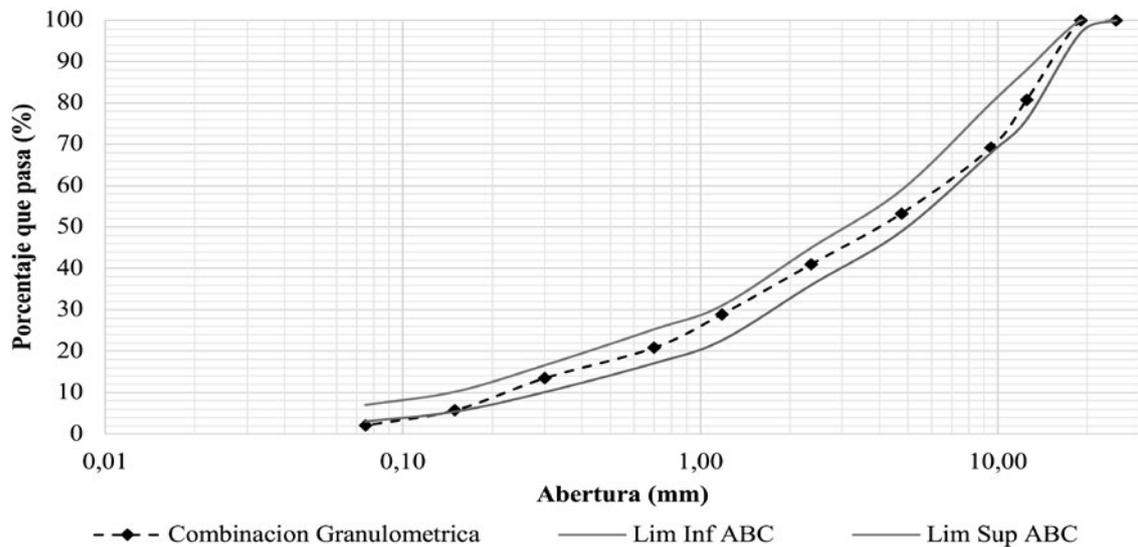


Figura 2. Curva granulométrica de las combinaciones para una mezcla asfáltica modificada.

2.4 Dosificación óptima de aditivo mejorador de adherencia a base de organosilanos

La dosificación del aditivo mejorador de adherencia en el uso de mezclas asfálticas convencional y modificada se determinó evaluando las respuesta pétreo-ligante mediante el ensayo de la DNER ME 078/94 (1994).

2.5 Evaluación de mezclas de susceptibilidad a la humedad

La evaluación de la susceptibilidad a la humedad se llevó a cabo mediante la comparación de la resistencia a la tensión indirecta. Para esto, se fabricaron 6 especímenes para cada mezcla, y la dosificación de cada una se ajustó para obtener un volumen de vacíos (VTM) de $7\pm 1\%$. Posteriormente, se evaluaron 3 especímenes en condiciones secas y 3 especímenes en condiciones de saturación al vacío. El procedimiento del ensayo se basó en la norma ASTM D4867 (ASTM, 2014).

2.6 Evaluación de mezclas a la deformación permanente

La evaluación de la deformación permanente de las mezclas asfálticas en el laboratorio es importante para prevenir la aparición temprana de patologías en los revestimientos asfálticos, como la deformación plástica, la deformación por consolidación y la deformación mecánica. El ensayo “*Hamburg Wheel Tracking*” es una simulación que caracteriza el comportamiento de la deformación permanente mediante repeticiones de carga de ejes de tránsito sobre las muestras de mezcla asfáltica hasta que se alcance el fallo o se desarrolle una deformación de 20 mm, bajo condiciones de humedad. Para esto, se realizaron dos especímenes para cada mezcla ensayada, y ambas mezclas se diseñaron para obtener un volumen de vacíos de $7\pm 1\%$. El procedimiento del ensayo se basó en la norma AASHTO T324 (AASHTO, 2004). Para llevar a cabo el ensayo en la rueda de Hamburgo, se necesitaron 4 probetas

sumergidas en agua a una temperatura de 50°C durante 30 minutos de acondicionamiento. Luego, una rueda de acero de 203 mm de diámetro y 47 mm de espesor recorrió la longitud de la muestra aplicando una carga de 705 ± 4.5 N a una velocidad de 50 ± 5 pasadas por minuto hasta alcanzar 20,000 pasadas o hasta que la muestra desarrolle una deformación de 20 mm.

3. Resultados y discusión

3.1 Diseño de las mezclas asfálticas

El diseño de la mezcla convencional se basó en los parámetros volumétricos proporcionados por el método de diseño Marshall, que incluyen la densidad, el volumen de vacíos (VTM), el volumen de vacíos llenos de asfalto (VFA), el volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA), la estabilidad y la fluencia, según las especificaciones del Instituto del Asfalto (Asphalt Mix Design Methods, 2014). Los resultados de los diseños propuestos se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4

Resultados obtenidos de los diseños de mezclas asfálticas

Parámetros volumétricos de la mezcla	Unidad	Limites		Diseño de mezclas asfálticas método Marshall	
		Min.	Máx.	60/70 convencional	SBS modificado
Cemento asfáltico óptimo	%	---	---	5.1	5.5
Compactación por golpes	golpes	---	---	75	75
Estabilidad mínima	N	8006	---	15600	17300
Flujo	0.25 mm	8	16	8.1	12.2
Vacíos con aire "VTM"	%	3	5	4.4%	4.6%
Vacíos en el agregado mineral "VMA"	%	14.4	---	15.3	16.6
Vacíos llenos de asfalto "VFA"	%	65	75	71	72
Densidad	g/cm ³	---	---	2.326	2.298

Fuente: Autores

3.2 Dosificación óptima de aditivo mejorador de adherencia a base de organosilanos

En la Tabla 5 se muestra un resumen de los ensayos y resultados obtenidos, por parte de los ensayos de adherencia, en un análisis a la mejora de la incorporación de aditivo mejorador de adherencia.

Tabla 5

Resultados obtenidos de dosis óptima de aditivo de adherencia a base de organosilanos

Resultados obtenidos	Porcentaje de cubrimiento del pétreo con el cemento asfáltico	
	Convencional 60/70	Modificado SBS
Sin aditivo	28.80	65.48
Dosis de 0.03%	60.03	78.09
Dosis de 0.05%	88.21	89.45
Dosis de 0.07%	95.84	96.47

Fuente: Autores

Según las especificaciones técnicas de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC, 2011), el porcentaje mínimo de cubrimiento de ligante al agregado grueso debe ser del 95%. Para lograr este porcentaje, se determinó que una dosis del 0.07% del peso del asfalto proporciona una adherencia del 95.84% con cemento asfáltico convencional 60/70 y del 96.47% con cemento asfáltico modificado SBS.

3.3 Evaluación de la susceptibilidad a la humedad

El ensayo fue realizado conforme la norma ASTM D4867 (2014). Los resultados de la evaluación de la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas convencional y modificada se presentan en la Tabla 6, donde se muestra el promedio del porcentaje de vacíos de cada grupo ensayado.

Tabla 6

Resultados obtenidos del ensayo de susceptibilidad a la humedad para mezclas asfálticas evaluadas

Tipo de mezcla	Cemento asfáltico	Cantidad de aditivo en la mezcla (%)	Descripción de cuerpos de prueba	Porcentaje de vacíos promedio (VTM) (%)	Resistencia a la tracción indirecta promedio (kPa)	Relación de resistencia a la tracción (%)
Convencional	60/70	0,00	Acondicionado	7,32	582,153	86,99
			Seco	7,49	669,201	
		0,07	Acondicionado	6,50	738,105	97,60
			Seco	6,49	756,288	
Modificado	Modificado SBS	0,00	Acondicionado	6,91	615,796	87,78
			Seco	6,90	701,536	
		0,07	Acondicionado	6,35	612,126	97,73
			Seco	6,63	626,333	

Fuente: Autores

En la Figura 3 muestra los resultados de la mezcla asfáltica convencional con la incorporación de un aditivo mejorador de adherencia a base de organosilanos en una dosis del 0.07%, así como los resultados de la mezcla asfáltica modificada con la misma dosis de aditivo.

En la Figura 3 se puede observar la evaluación de la resistencia a la tensión indirecta de la mezcla asfáltica convencional con cemento asfáltico 60/70. Se evidencia que la adición del aditivo mejorador de adherencia al 0.07% resulta en una mejora significativa en la resistencia en comparación con la mezcla sin aditivo. Además, se observa que la mezcla asfáltica modificada con cemento asfáltico SBS (65/80) muestra una mejora del 9.95% en la resistencia a la humedad al utilizar un aditivo mejorador de adherencia a base de organosilanos en una dosis del 0.07% en relación con el peso del ligante.

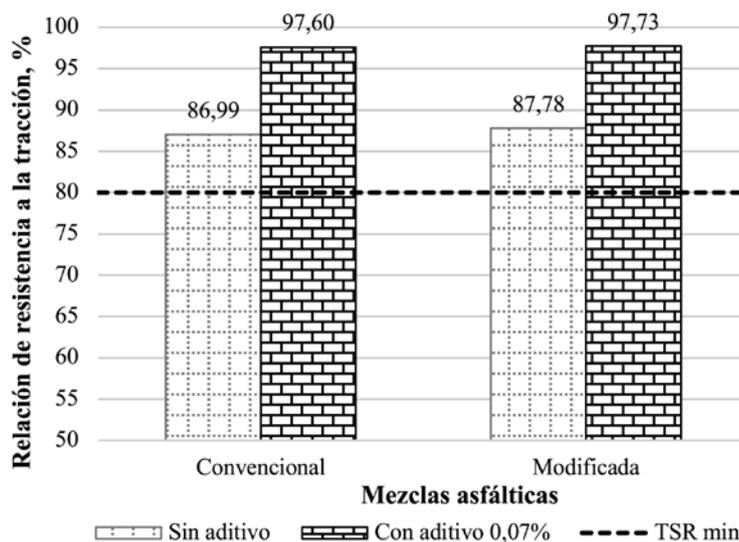


Figura 3. Resultados obtenidos del ensayo de susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas estudiadas.

3.4 Evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente

En la Tabla 7 se presenta los resultados obtenidos en el ensayo de rueda de Hamburgo, donde se observa el número de pasadas y deformación producida por cada rueda para cada diferente tipo de mezcla asfáltica.

Tabla 7

Resultados obtenidos del ensayo de deformación permanente según número de pasadas para las mezclas asfálticas evaluadas

Tipo de mezcla	Cemento asfáltico	Cantidad de aditivo en la mezcla (%)	Rueda	Porcentaje de vacíos promedio (VTM) (%)	Ahuellamiento desarrollado (mm)	Ahuellamiento promedio (mm)
Convencional	60/70	0,00	1	8,47	20,09	20,10
			2	7,67	20,11	
		0,07	1	7,50	13,83	13,61
			2	7,67	13,39	
Modificado	Modificado SBS	0,00	1	7,33	7,18	5,57
			2	6,91	3,95	
		0,07	1	7,67	2,34	3,34
			2	6,77	4,34	

Fuente: Autores

En la Figura 4 se muestra la comparación promedio de la deformación permanente presentada por las dos ruedas evaluadas para las mezclas asfálticas convencional y modificada.

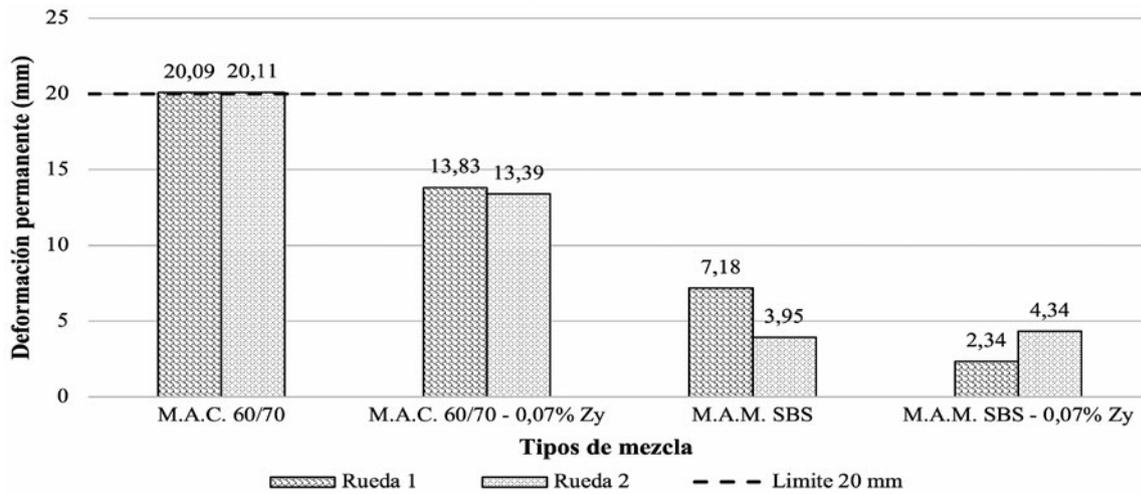


Figura 4. Resultados obtenidos del ensayo de deformación permanente de las mezclas asfálticas estudiadas.

Al analizar la Figura 4, se observa una notable mejora en términos de deformación (ahuellamiento) en la mezcla convencional al agregar un aditivo mejorador de adherencia al 0.07%. En contraste, la mezcla asfáltica convencional sin aditivo no cumple con la deformación admisible, alcanzando los 20.10 mm en la pasada 19860. Cabe destacar que la deformación máxima permitida en el ensayo es de 20 mm a las 20000 pasadas. Por otro lado, la mezcla asfáltica convencional con aditivo logra completar las 20000 pasadas con una deformación de 13.61 mm, cumpliendo con el límite máximo establecido. Estos resultados indican claramente los beneficios favorables del aditivo mejorador de adherencia a base de organosilanos en términos de deformación permanente.

En la Figura 4 también se puede apreciar una notable mejora en la mezcla asfáltica modificada al agregar un aditivo mejorador de adherencia al 0.07%, en comparación con la mezcla modificada sin aditivo. En términos de deformación promedio en las dos ruedas, la mezcla modificada sin aditivo alcanza una deformación de 5.57 mm a las 20000 pasadas, cumpliendo con los parámetros del ensayo de deformación permanente. Por otro lado, al agregar un aditivo mejorador de adherencia del 0.07% al cemento asfáltico modificado SBS (65/80), se logra una mejora significativa en la deformación, llegando a tan solo 3.34 mm a las 20000 pasadas. Estos resultados demuestran claramente los beneficios del aditivo en la reducción de la deformación permanente en la mezcla asfáltica modificada.

4. Conclusiones

En el estudio realizado sobre las mezclas asfálticas convencionales y modificadas, se cumplió con los requisitos de gradación "C" establecido por la ABC. Para la mezcla asfáltica modificada con cemento asfáltico modificado SBS, se determinó que el porcentaje óptimo de ligante es del 5.5%, lo cual resulta en una mayor estabilidad y un porcentaje de vacíos del 4.6%. En el caso de la mezcla asfáltica convencional, se encontró que el porcentaje óptimo de ligante es del 5.1%, también con una mayor estabilidad y un porcentaje de vacíos del 4.4%.

Asimismo, se evaluó la dosificación óptima de un aditivo mejorador de adherencia en las mezclas asfálticas. Los resultados mostraron que, sin aditivo, el cemento asfáltico convencional 60/70 presentó un valor de adherencia del 28.8%. Sin embargo, al agregar un aditivo al 0.07%, la adherencia aumentó significativamente a 95.84%. Para el cemento asfáltico modificado SBS, la adherencia sin aditivo fue del 65.46%, pero al añadir el aditivo al 0.07%, se registró una mejora en la adherencia del 96.4%.

Estos hallazgos demuestran mejoras sustanciales en las mezclas asfálticas convencionales y modificadas al incorporar un aditivo de adherencia a base de organosilanos al 0.07%. Se observó un incremento del 10.61% y 9.95% en la resistencia a la humedad de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas, respectivamente. Además, se evidenció una reducción significativa del 32.30% y 40.04% en la deformación permanente, respectivamente, en comparación con las mezclas convencionales y modificadas sin aditivo de adherencia.

5. Recomendaciones

Realizar un estudio de análisis de comparación del desempeño de las mezclas asfálticas donde se incorpore diferentes aditivos de adherencia con el propósito de realizar un análisis de costo-beneficio de los aditivos mejoradores de adherencia.

Agradecimientos

Agradecimiento especial al Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos por brindar los medios necesarios por los cuales fue posible ejecutar este proyecto.

6. Referencias bibliográficas

- AASHTO T324. (2004). *Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)*. American Association of Highway and Transportation Officials. USA.
- ABC. Administradora Boliviana de Carreteras. (2011). *Manual de especificaciones técnicas de construcción*. Bolivia
- AMAAC. (2013). Asociación Mexicana del Asfalto. Protocolo AMAAC PA-MA-01/2013: Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño. México.
- Asphalt Mix Design Methods. (2014). *Asphalt Mix Design Methods* (Vol. Seventh Edition). USA.
- ASTM D4867.(2014). *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Pavement Mixtures*. USA: American Society of Testing and Materials.
- Botasso, G. H., Rebello, O. R., Soengas, C., & Balige, M. (2020). *Metodología para la evolución en la incorporación de promotores de adherencia en cementos asfálticos*. Rio de Janeiro - Brasil: XVI CILA - Congreso Ibero - Latinoamericano del Asfalto.
- Caro, S., & Alvarez, A. (2011). *Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas*. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de Los Andes. Bogotá. Colombia.
- DNER-ME 078/94. (1994). Agregado graúdo - adhesividade a ligante betuminoso. Departamento Nacional de Estradas Rodagem. Brasil.
- El Deber. (13 de febrero de 2019). *ABC: el 80% de carreteras presentan problemas por lluvias y derrumbes*. https://eldeber.com.bo/bolivia/abc-el-80-de-carreteras-presentan-problemas-por-lluvias-y-derrumbes_76565.
- INVIAS. (2013). Instituto Nacional de Vías. *Especificaciones generales de Construcción de Carreteras*. Ministerio de Transporte. Colombia
- Zydex. (2015). *Zycotherm Nanotecnología Para Pavimentos Asfálticos*. http://www.brem.com.pe/14_Spanish_ZT_July2015.pdf





Artículo de Divulgación

Búsqueda de dígitos en secuencia de números naturales

Rimer Zurita

Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón,
Cochabamba, Bolivia

zurita.math@gmail.com

Resumen

Se construye un algoritmo que nos permite encontrar el dígito que corresponde a la posición N-esima de la secuencia de números naturales. El citado algoritmo hace uso de la función W de Lambert y fue implementado en el programa MATHEMATICA, obtiene de manera eficiente resultados para entradas grandes N del orden de 10^{1000} .

Palabras clave: *Función W de Lambert, MATHEMATICA, Secuencias.*

Abstract

An algorithm is developed to compute the digit corresponding to the N-th position in the sequence of natural numbers. The algorithm makes use of the Lambert W function and was implemented in the MATHEMATICA program. It efficiently obtains results for large inputs N on the order of 10^{1000} .

Key words: *Lambert W function, MATHEMATICA, Sequences.*

1. Introducción

Dada una secuencia de símbolos cuya construcción está determinada por ciertas reglas preestablecidas, nos preguntamos que símbolo corresponde a una posición N dada. Por ejemplo, la siguiente secuencia de unos y ceros

100111000011111000000...

fue construida de la siguiente manera: comenzamos escribiendo un uno, luego dos ceros, luego tres unos, luego cuatro ceros y así sucesivamente. Nos preguntamos por ejemplo que dígito ocupa la posición número 729 o la posición 13.542.

En el presente trabajo tratamos de responder a un problema similar donde la secuencia está dada por

12345678910111213141516171819202122 ... (P)

es decir, escribimos los números naturales uno por uno y uno a continuación del otro. Dada la entrada N nos preguntamos que dígito del 0 al 9 corresponde a esta posición. Por ejemplo, si $N=10$ el dígito es 1, si $N=32$ el dígito es 2. Este problema fue planteado en concursos de informática y se lo discutió entre los docentes del departamento de Matemáticas de la FCyT.

El problema descrito puede ser resuelto mediante un programa en ordenador usando contadores y controles de iteraciones. Sin embargo, lo que pretendemos en el presente trabajo es la de construir alguna función matemática $f(N)$ o algún algoritmo eficiente que permita encontrar el dígito de la secuencia (P) que corresponde a la posición N, para entradas N, grandes.

2. Materiales y métodos

Serie Geométrica

La serie geométrica está dada por

$$\sum_{k=0}^{\infty} x^k = \frac{1}{1-x}; |x| < 1.$$

Se puede derivar e integrar término a término para obtener otras series, por ejemplo, si la derivamos

$$\sum_{k=0}^{\infty} (k+1)x^k = \frac{1}{(1-x)^2}; |x| < 1,$$

y si la integramos

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{x^k}{k} = -\log(1-x); |x| < 1.$$

Donde la función log representa en todo el artículo la función logaritmo natural. Para profundizar sobre series puede consultar (Abramowitz et al, 1972).

Aritmética Modular

Decimos que dos enteros x,y son congruentes módulo m con $m \in \mathbb{N}$, si m divide a la diferencia $x-y$, escribimos

$$x \equiv y \pmod{m}.$$

Notemos que si dividimos x entre m , $x = mq + r$ donde $0 \leq r \leq m - 1$ es el resto de la división, se tiene

$$x \equiv r \pmod{m}.$$

Cuando se trabaja módulo m se trabaja entonces en el anillo $Z = \{0,1,2,\dots,m-1\}$, formado por los restos de dividir los números enteros entre m . Existen varias propiedades naturales de las congruencias, por ejemplo

- 1 Si $x \equiv y \pmod{m}$ y $n \in \mathbb{N}$, entonces $x^n \equiv y^n \pmod{m}$.
- 2 Si $x \equiv y \pmod{m}$ y $x' \equiv y' \pmod{m}$, entonces $xx' \equiv yy' \pmod{m}$.

En el presente artículo escribimos $x \pmod{m}$ que significa hallar el resto de dividir x entre m . Para profundizar sobre congruencias puede consultar (Apóstol, 1976)

Función parte entera

Para x real, definimos su parte entera como

$$[x] = \text{el entero más grande menor o igual a } x.$$

Entre algunas propiedades remarcables de esta función se tienen las siguientes:

- 1) $[x] + [y] \leq [x + y] \leq [x] + [y] + 1.$

- 2) Si a, b son enteros positivos

$$\sum_{k=1}^{b-1} \left\lfloor k \frac{a}{b} \right\rfloor = \frac{(a-1)(b-1) + \text{mcd}(a,b) - 1}{2}.$$

- 3) Si $f(n) = \sum_{d|n} g(d)$, entonces $g(n) = \sum_{d=1}^n \left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor f(d).$

Para profundizar sobre la función parte entera puede consultar (Graham et al., 1994)

Función W de Lambert

La función $W(x)$ de Lambert definida de

$[-\frac{1}{e}, \infty)$ hacia $[-1, \infty)$, es la función inversa de la función real $z \mapsto ze^z$. Entonces por definición $W(x)e^{W(x)} = x$. Esta función viene implementada en varios programas matemáticos como ser Maple, Matlab, Mathematica, Python, Máxima. Gracias a esta función podemos resolver ecuaciones donde la incógnita aparece como exponente o como término libre. Por ejemplo, la ecuación

$$a^x = b(x-r)$$

tiene como solución en x

$$x = r - \frac{1}{\log a} W\left(\frac{-a^r}{b} \log a\right),$$

Para profundizar sobre la función W de Lambert puede consultar (Roy et al., 2010)

3. Resultados y discusión

Dada la secuencia (P) y dado N , queremos hallar una función $f(N)$ que determine el dígito N -ésimo de esta secuencia. Observamos que existen nueve números del 1 al 9 con un solo dígito, noventa números del 10 al 99 con dos dígitos, novecientos números del 100 al 999 con tres dígitos, etc. Consideramos entonces la suma

$$S(i) = 9 + 2 \cdot 90 + 3 \cdot 900 + \dots + (i+1) \cdot 9 \cdot 10^i = 9 \cdot \sum_{k=0}^i (k+1) \cdot 10^k.$$

Sabemos que para todo x real,

$$\sum_{k=0}^{i+1} x^k = \frac{1-x^{i+2}}{1-x},$$

derivando respecto a x resuelta

$$\sum_{k=0}^i (k+1)x^k = \frac{x^{i+1} \cdot ((i+1)x - i - 2) + 1}{(x-1)^2}$$

En nuestro caso haciendo x=10, buscamos el índice mayor n tal que

$$S(n) \leq N$$

es decir,

$$\frac{9 \cdot (10^{n+1}(10(n+1) - (n+2)) + 1)}{9^2} \leq N.$$

Haciendo cálculos obtenemos

$$\begin{aligned} 10^{n+1}(9n+8) &\leq 9N-1 \\ 10^{n+8/9}(n+8/9) &\leq 10^{-1/9}(N-1/9) \\ e^{(n+8/9)\log 10}(n+8/9)\log(10) &\leq 10^{-1/9}\log(10)(N-1/9) \\ (n+8/9)\log(10) &\leq W(10^{-1/9}\log(10)(N-1/9)) \\ n &\leq \frac{1}{\log(10)}W(10^{-1/9}\log(10)(N-1/9)) - 8/9. \end{aligned}$$

Usando el hecho de que la función W de Lambert es creciente, se obtiene

$$n = \lfloor \frac{1}{\log(10)}W(10^{-1/9}\log(10)(N-1/9)) - 8/9 \rfloor.$$

Calculamos ahora

$$S(n) = \frac{10^{n+1}(9n+8)+1}{9},$$

el dígito que buscamos se encuentra en el intervalo $[10^{n+1}, 10^{n+2})$ y S(n) representa la cantidad de dígitos hasta $10^{n+1}-1$. Consideramos ahora

$$a = N - S(n),$$

que indica la cantidad de dígitos aún por contar desde 10^{n+1} hasta encontrar el dígito N-ésimo de la secuencia (P).

Sea

$$c = \lfloor \frac{a}{n+2} \rfloor; r = a \bmod (n+2).$$

A partir de 10^n los dígitos aparecen de n+2 en n+2, entonces c representa la cantidad de números que recorrimos desde 10^{n+1} y r el resto encontrado hasta hallar el N-ésimo número de la secuencia.

Sea

$$M = 10^{n+1} + c - 1,$$

que representa el último número antes de hallar el N-ésimo dígito. Tenemos dos casos

- Si $r = 0$, entonces el dígito N-ésimo es $M \bmod 10$.
- Si $1 \leq r \leq n+1$, el dígito N-ésimo es $\lfloor \frac{M+1}{10^{n+2-r}} \rfloor \bmod 10$.

Todo el proceso explicado se puede resumir en el algoritmo de la Figura 1.

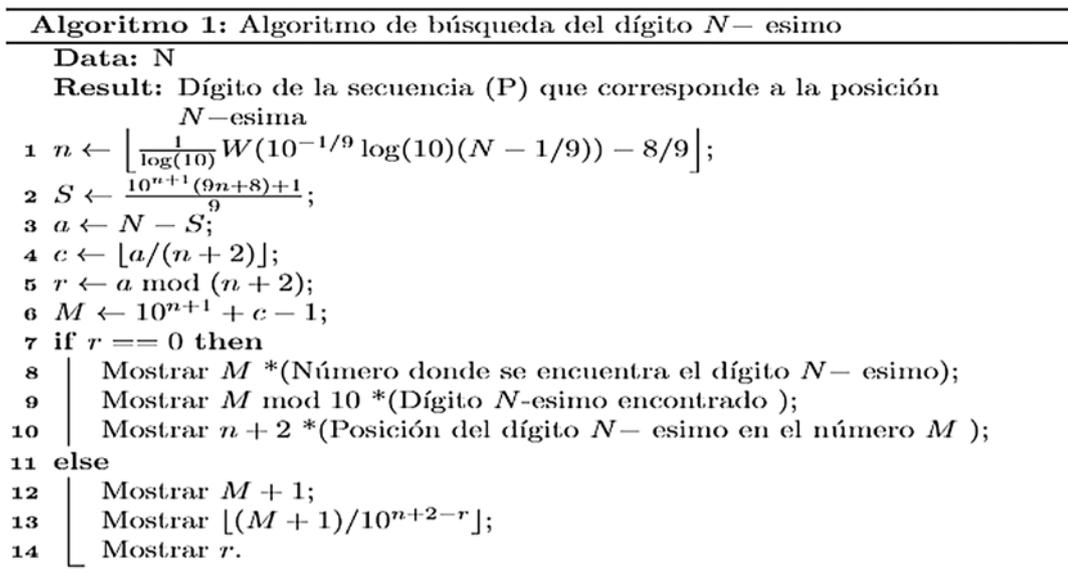


Figura 1. Algoritmo para la búsqueda del dígito N-ésimo de la secuencia de números naturales.

El algoritmo descrito fue implementado en MATHEMATICA, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Simulación numérica usando MATHEMATICA para hallar el dígito N-esimo de la secuencia (P) de números naturales

<i>N</i>	Dígito	Número que corresponde	Posición del número que corresponde
10^3	3	370	1
10^6	1	185185	1
10^{15}	2	72.222.222.222	3
10^{20}	3	5.321.637.426.900.584.795	6
10^{25}	2	421.296.296.296.296.296.296	7

4. Discusión

Se ha construido un algoritmo que nos permite hallar de manera eficiente el dígito N- esimo que corresponde a la secuencia (P). Algoritmos similares pueden ser contruidos si la secuencia está dada por los números naturales escritos en cualquier otra base, por ejemplo, en binario o en base hexadecimal.

Podemos tratar de generalizar el problema propuesto de la siguiente manera. Dada una secuencia de números naturales

$$f(1)f(2)f(3)f(4) \dots$$

donde $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$, hallar el dígito N - esimo que corresponde a dicha secuencia. Por ejemplo $f(n) = n^2$ o $f(n) = n^3$. Este problema queda abierto para futuras investigaciones.

Debemos comenzar a familiarizarnos cada vez más con el uso y empleo de funciones especiales como la función W de Lambert, la función Gamma, la función Zeta de Riemann, las funciones Polilogarítmicas, etc. Todas estas funciones vienen ya implementadas en diferentes programas matemáticos, y estas poseen propiedades que nos permiten resolver problemas de distinto índole y dificultad.

5. Recomendaciones

Se recomienda resolver la generalización del problema descrita en la sección anterior. El algoritmo construido debe ser capaz de calcular de manera eficiente el dígito N- esimo de secuencias para entradas N de números grandes.

Agradecimientos

Agradecimiento especial a Álvaro Carrasco, quien me propuso el presente problema y con quien discutimos posibles soluciones.

6. Referencias bibliográficas

- Abramowitz, M. and Stegun, I.A. (1972) Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables. Dover Publ., Inc., New York.
- Apostol, T. M. (1976) Introduction to Analytic Number Theory. Undergraduate Texts in Mathematics. Springer, New York. doi: 10.1007/978-1-4757-5579-4
- Graham R.L., Knuth D.E. and Patashnik O. (1994), Concrete Mathematics, Reading Ma.: Addison-Wesley.
- Roy, R.; Olver, F. W. J. (2010), Lambert W function, in Olver, Frank W.J.; Lozier, Daniel M.; Boisvert, Ronald F.; Clark, Charles W. (eds.), NIST Handbook of Mathematical Functions, Cambridge University Press.

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Todos los manuscritos sometidos a la **REVISTA FACULTATIVA CIENCIA Y TECNOLOGÍA** deben ser entregados en formato digital DOC o RTF para hojas tamaño carta, con márgenes de 2,5 cm. Todas las páginas deben ser numeradas de manera consecutiva en el ángulo superior derecho, y las líneas deberán ser numeradas junto al margen izquierdo, en todo el trabajo. Deben llevar *i*) una carátula – indicando el título, su(s) autor(es), afiliación y dirección (institucional), resumen y palabras clave- *ii*) el texto del manuscrito y *iii*) los agradecimientos, la lista de referencias bibliográficas, las tablas y figuras.

Los **artículos científicos** están basados en una investigación completa, presentan datos originales, y organizan su texto bajo los títulos primarios de: introducción, métodos, resultados y discusión (con conclusiones o recomendaciones opcionales). Los **artículos de divulgación científica o de interés institucional**, son más flexibles en su estructura y pueden mantener algunos títulos principales (introducción, discusión) e incorporar otros. El texto normal de todos los manuscritos debe usar letra Times New Roman 12 puntos, a 1,5 espacios entre líneas y justificado a la izquierda, pero en tablas complejas puede reducirse a 10 puntos e interlineado simple. El uso de letra cursiva se restringirá a palabras en latín u otro idioma. La extensión máxima de los artículos científicos será de 25 páginas (contando referencias, figuras y cuadros). La extensión máxima de los artículos de divulgación será de 15 páginas.

Las cifras con cuatro o más dígitos llevarán punto como separador de mil (2.500 m), excepto en los años. El separador decimal es la coma.

Para todas las unidades utilice el sistema métrico internacional (Système International d'Unités, SI).

Título: ilustrativo del contenido, conciso.

Autor(es): nombre(s) y apellido(s) de cada uno, indicando con un superíndice numerado su respectiva afiliación y dirección institucional, y dirección de correo electrónico.

Resumen: hasta 250 palabras en un solo párrafo; debe dar una reseña informativa de objetivos, métodos, resultados y las principales conclusiones. No debe incluir citas bibliográficas.

Palabras clave: 5 términos compuestos o simples, que no repiten los del título, ordenados alfabéticamente.

Abstract: resumen en idioma inglés.

Key words: Palabras clave en idioma inglés.

Texto: dividido en secciones principales - introducción, métodos, resultados, discusión, agradecimientos y referencias bibliográficas- u otras más adecuadas a la estructura de artículos de divulgación, ensayos o revisiones- las que llevan formato de título primario (ej. DISCUSIÓN, en mayúscula y negrita). Los títulos secundarios e inferiores deberán distinguirse de manera fácil y consistente por su estilo a lo largo del texto, y no estarán numerados. Los niveles de subtítulos deben mantenerse al mínimo, y ser consistentes entre secciones.

Citas bibliográficas: establecen la autoría de los datos o ideas ajenas mencionadas en el texto (en introducción, métodos o discusión), en tablas o figuras. Permiten buscar la fuente original que debe estar listada al final en **referencias bibliográficas**. Usar estilo APA sexta edición. Se recomienda utilizar un gestor de referencias (Por ejemplo, Mendeley)

Cuadros: Los cuadros se deben incluir al final del texto, cada uno en una hoja separada y precedidos por su leyenda. En el texto, se debe señalar el lugar aproximado donde se insertará cada cuadro. Deben presentarse como tablas de Word, sin líneas verticales, y deben contar con título y encabezados (de columnas y filas).

Figuras: pueden ser mapas, gráficos, dibujos o fotos. Deben estar impresas en páginas separadas al final del manuscrito y contar con sus respectivas leyendas. Los detalles de dibujos y gráficos (letras, símbolos) deben ser legibles si son reducidos ($\leq 50\%$) para la impresión final. Todos los términos, abreviaturas y símbolos usados deben ser consistentes entre figuras, tablas y el texto. En el texto, se debe señalar el lugar aproximado donde se insertará cada figura.

Agradecimientos: En esta sección se debe hacer los reconocimientos que los autores creen necesarios a personas e instituciones. Asegúrese de escribir oraciones completas, por ejemplo: “agradecemos a José Pérez por sus sugerencias para mejorar el artículo”, “agradezco a Perico González por su asesoramiento en el manejo estadístico de los datos”, “Este trabajo fue parcialmente financiado por una beca de la ABC.” No es necesario utilizar títulos (Dr., M.Sc., Lic., etc.).

Referencias bibliográficas: El propósito de esta sección es dar el crédito a los autores de quienes se tomó ideas o datos. Antes de someter su manuscrito verifique que toda la literatura citada en el texto esté incluida en la lista de referencias y que ninguna referencia que no se haya citado en el texto haya sido incluida en la lista de referencias. Usar estilo APA sexta edición. Es recomendable generar la lista de referencias con ayuda del gestor de referencias usado para insertar las citas bibliográficas.



📍 Calle Sucre frente Parque la Torre

☎ 4543232 - 4232548 - 4231765

✉ iicyt@fcyt.umss.edu.bo

🌐 www.fcyt.umss.edu.bo

📘 Facultad de Ciencias y Tecnología UMSS - Página Oficial